Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 44

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года
Выходит 4 раза в год

ISSN 2074-2762

Санкт-Петербург

РГГМУ

2016

УДК 3 + 502.52 + 55
ББК 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 44. Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2016. – 265 с.

В издании представлены статьи сотрудников университета и приглашенных специалистов по широкому спектру направлений научной деятельности университета. Материал сгруппирован по специальностям. Главное внимание уделено проблемам изменения климата, физических процессов в морях, водохозяйственных исследований, экономических механизмов рационального природопользования. В разделе «Хроника» освещены основные события жизни университета.

Предназначен для ученых, исследователей природной среды, экономистов природопользования, аспирантов и студентов, обучающихся по данным специальностям.

Редакционный совет:
Михеев В.Л., канд. юрид. наук, и.о. ректора РГГМУ — *председатель совета*.
Вильфанд Р.М., д-р техн. наук, проф., директор ГМНИЦ РФ; **Кулешов Ю.В.**, д-р техн. наук, проф., зам. начальника Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского по учебной и научной работе; **Лил В.У.**, д-р наук, проф. университета г. Гамбург (Германия) и университета г. Манчестер (Великобритания); **Румянцев В.А.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАН, научный руководитель Института озероведения РАН; **Федоров М.П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, научный руководитель программы НИУ СПб ГПУ; **Фролов И.Е.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАЕН, директор ГНЦ ААНИИ; **Хуакин Л.**, д-р наук, проф., вице-ректор Морского университета г. Джейянг (КНР); **Шапрон Б.**, д-р наук, ведущий ученый института морских исследований IFREMER (Франция); **Филатов Н.Н.**, д-р геогр. наук, проф., член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института водных проблем севера КарНЦ РАН.

Редакционная коллегия:
Малинин В.Н., д-р геогр. наук, проф. — *главный редактор.*
Воробьёв В.Н., канд. геогр. наук, проф. — *зам. главного редактора.*
Шилин М.Б., д-р геогр. наук, проф. — *отв. секретарь.*
Бескид П.П., д-р техн. наук, проф.; **Быкова Е.В.**, д-р филолог. наук; **Гогоберидзе Г.Г.**, д-р эконом. наук; **Коваленко В.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Кудрявцев В.Н.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Смышляев С.П.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Угрюмов А.И.**, д-р геогр. наук, проф.; **Фирова И.П.**, д-р эконом. наук, проф.

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал зарегистрирован в Управлении Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному Федеральному округу.

Свидетельство ПИ № ФС2-8484 от 07.02.2007 г.

Специализация: метеорология, гидрология, океанология, геоэкология, геофизика, общественные и гуманитарные науки.

Подписной индекс 78576 в каталоге «Каталог российской прессы «Почта России».

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки (http://elibrary.ru).

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции:
Россия, 195196, Санкт-Петербург,
Малоохтинский пр., 98.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2016
© Авторы публикаций, 2016

ISSN 2074-2762

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

THE FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL
INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
"RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY"

PROCEEDINGS

OF THE RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY

№ 44

A theoretical research journal

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 2074-2762

St. Petersburg

RSHU

2016

UDC 3 + 502.52 + 55
LBC 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal. Issue 44. – St. Petersburg: RSHU Publishers, 2016. – 265 pp.

The journal presents research papers of the University associates and invited specialists dealing with a broad range of directions in the scientific activities of the University. The material is grouped according to areas of research. Much attention is given to problems of climate change, physical processes in the seas, water management studies, economic mechanisms of rational nature management. Section «Chronicle» highlights major events in the University's life.

The journal is intended for scientists studying the environment, specialists in economics of nature management, PhD students and undergraduates specializing in these fields of knowledge.

The Editorial Board:
Mikheyev V.L., Candidate of Juridical Sciences, acting Rector of RSHU — *Chairman*.
Vilfand R.M., Doctor of Engineering Science, Professor, Director of Hydrometeorological Research Centre of Russian Federation; **Kuleshov Yu.V.**, Doctor of Engineering Science, Professor, deputy director of Mozhaisky Military Space Academyfor academic affairs and research; **Leal W.**, Dr. Professor of Hamburg University (Germany) and Manchester University (Great Britain); **Rumyantsev V.A.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, scientific director of the Institute of Limnology RAS; **Fedorov M.P.**, Doctor of Engineering Science, Academician of the Russian Academy of Sciences, President of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; **Frolov I.E.**, Doctor of Geographical Sciences, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences; **Huaqing Lu**, Dr., Professor, vice-rector of Maritime University of Zhejiang (China); **Shapron B.**, Dr., leading scientist of French Research Institute for Exploitation of the Sea IFREMER (France); **Filatov N.N.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, chief researcher at the Institute of Water Problems of the North Karelian Research Centre of RAS.

Editors:
Malinin V.N., Doctor of Geographical Sciences, Professor – *Editor in Chief*.
Vorobyev V.N., Candidate of Geographical Sciences, Professor – *Deputy Editor in Chief*.
Shilin M.B., Doctor of Geographical Sciences, Professor – *Executive editor*.
Beskid P.P., Doctor of Engineering Science, Professor; **Bykova E.V.**, Doctor of Philology; **Gogoberidze G.G.**, Doctor of Economics; **Kovalenko V.V.**, Doctor of Engineering Science, Professor; **Kudryavtsev V.N.**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor; **Smyshlyaev S.P.**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor; **Ugryumov A.I.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **Firova I.P.**, Doctor of Economics, Professor.

The Journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, which should publish the main results of theses for the Doctor and Candidate of sciences degree.

The Journal is registered in the Russian Federal Surveillance Service for Compliance with the Law in Mass Communications and Cultural Heritage Protection in the North-western Federal District.

Certificate ПИ № ФС2-8484 of July 02, 2007.

Area of expertise: meteorology, hydrology, oceanology, geoecology, geophysics, social and human sciences.

Subscription index 78576 in «Catalogue of the Russian press «Post of Russia».

The Journal is included in the «Russian Science Citation Index» database (RSCI), based on the platform of the National Electronic Library (http://elibrary.ru).

Any use of this Journal in whole or in part, must include the customary bibliographic citation.

Editorial Board's point of view may not be concurrent with opinion of the authors.

Editorial Office address:
195196, Malookhtinsky Ave, 98, St. Petersburg, Russia

ISSN 2074-2762

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2016
© Authors of publications, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Геофизика

Шнеерсон Е.З. О некоторых фундаментальных закономерностях динамики механических систем с существенно неидеальными связями 9

Гидрология

Барышников Н.Б., Исаев Д.И., Дрегваль М.С., Гаврилов И.С. Взаимодействие русловых и пойменных потоков 14
Виноградов А.Ю., Догановский Д.А. Состояние гидрометрических наблюдений на малых реках 23
Гордеева С.М., Малинин В.Н. Использование Data Mining в задаче гидрометеорологического прогнозирования 30
Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Соловьев Ф.Л., Бонгу С.Э., Джалалванд А. О возможности учета испарения при моделировании процесса формирования многолетнего речного стока (на примере Западной Африки) 45
Соколова Д.В., Алексеева Е.Г., Шеманаев К.В. Особенности технологии автоматизированного прогнозирования опасных гидрологических явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации 54
Шмакова М.В., Кондратьев С.А., Маркова Е.Г. Пространственно-временные закономерности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами (по результатам математического моделирования) 61

Океанология

Войнов Г.Н. Приливы в Обской губе (Карское море). I. Общая характеристика приливов 70
Гордеева С.М., Жарова А.Д. Оперативная оценка рыбопромысловой обстановки в юго-восточной части Тихого океана 96
Зимин А.В. Закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в Белом море 104
Фарджами Х., Голубкин П.А., Кудрявцев В.Н. Развитие ветровых волн в прибрежных зонах при переменных ветрах на примере Персидского залива и Аравийского моря 121
Шатрова О.В., Еремина Т.Р., Ланге Е.К. Анализ изменчивости параметров эвтрофирования в Финском заливе по данным натурных наблюдений 129

Метеорология

Боков В.Н., Воробьев В.Н. Прогнозы сейсмических событий с использованием геофизических и атмосферных предвестников 141
Кондове А.Л. Сравнение схем физических параметризаций в модели WRF 149
Моисеева Н.О., Ременсон В.А., Румянцева Е.А. Применение методов синоптической климатологии в автоматизированных системах статистической интерпретации выходной продукции прогностических гидродинамических моделей атмосферы 157

Смышляев С.П., Галин В.Я. Исследование влияния изменений стратосферного озона на химию тропосферы 165
Шермухамедов А.А., Шермухамедов У.А. Методика расчета и критерии оценки нелинейной модели концентрации тропосферных газов 180

Геоэкология

Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Ковалева О.А., Леонтьев И.О., Жамойда В.А., Колесов А.М. Проблемы абразии берегов восточной части Финского залива: состояние, прогноз, рекомендации по берегозащите 187
Канджанасири Вираекха, Сувансак Темсак, Лертрактавикул Чайпат, Салаеной Ганасит. Использование традиционного знания для предупреждения заболеваний путем использования местных трав в провинции Питсанулок, Таиланд 204
Федоров М.П., Шилин М.Б. Экологический опыт эксплуатации первой советской приливной электростанции на Русском Севере (Кислая Губа Баренцева моря) 209

Информационные технологии

Истомин Е.П., Фокичева А.А., Коршунов А.А., Слесарева Л.С. Управление гидрометеорологическими рисками в социально-экономических системах 219

Социально-гуманитарные науки

Воропаева И.Д., Шилин М.Б. Опыт морского пространственного планирования в Российской Федерации на примере Балтийского моря 225
Лазар М.Г. Реформа высшего образования России — итоги и последствия глазами социологии образования 232
Трубина М.А., Скорик Я.В., Семова Е.К., Цейтлин И.В. Исследование процесса адаптации иногородних студентов к вузовскому обучению 245

Хроника 255
Список авторов 261
Условия публикации в журнале «Ученые записки РГГМУ» 263

CONTENTS

Geophysics

Shneyerson E.Z. On certain basic dynamical properties of the mechanical systems with strongly non-ideal constraints 9

Hydrology

Baryshnikov N.B., Isaev D.I., Dregval M.S., Gavrilov I.S. Interaction channel and floodplain flows 14
Vinogradov A.Yu., Doganovsky D.A. Condition of hydrometric supervision on the small rivers. 23
Gordeeva S.M., Malinin V.N. Use of Data Mining in hydrometeorological forecasting . . . 30
Kovalenko V.V., Gaidukova E.V., Solovyev F.L., Bongu S.E., Jalalvand A. The possibility of accounting evaporation at modeling of formation of river flow (on the example of West Africa) 45
Sokolova D.V., Alekseeva E.G., Shemanaev K.V. Features of technology of automated forecasting hazardous hydrological events in ungauged and poorly gauged basins of the Russian Federation 54
Shmakova M.V., Kondratyev S.A., Markova E.G. Spatial and temporal patterns of reservoir Sestroretsky Razliv silting by river sediments (according to mathematical modeling) 61

Oceanology

Voinov G.N. Tides in the Gulf of Ob (Kara sea). I. General characteristics of tide 70
Gordeeva S.M., Zharova A.D. Operational assessment of fisheries in the Southeast Pacific 96
Zimin A.V. Regularities of submesoscale processes and phenomena in the White Sea 104
Farjami H., Golubkin P.A., Kudryavtsev V.N. Wind-wave growth under varying wind condition case studies in the Persian Gulf and Arabian Sea 121
Shatrova O.V., Eremina T.R., Lange E.K. Variability of parameters of eutrophication in the Gulf of Finland based on field observations 129

Meteorology

Bokov V.N., Vorobyev V.N. Predictions of seismic events using geophysical and atmospheric precursors 141
Kondowe A.L. A comparison of physical parameterization schemes in the WRF model 149
Moiseeva N.O., Remenson V.A., Rumiantceva E.A. Application of the synoptic climatology method in automated systems of the statistic interpretation of the output production of the predictive hydrodynamic models of the atmosphere 157
Smyshlyaev S.P., Galin V.Ya. A study of stratospheric ozone impact on the tropospheric chemistry 165
Shermukhamedov A.A., Shermukhamedov U.A. Design procedure and criteria for evaluating the nonlinear model of concentrations of tropospheric gases. 180

Geoecology

Ryabchuk D.V., Sergeev A.Yu., Kovaleva O.A., Leont'ev I.O., Zhamoida V.A., Kolesov A.M. Problems of coastal erosion in the Eastern Gulf of Finland: state, prognosis of development, recommendations on coast protection 187
Kanjanasiri Wiraekha, Suwansak Temsak, Lertraktaweekul Chaipat, Salaenoy Ganasit. Local wisdom about villagers' folk medicinal herbs on cure disease in Phitsanulok Province, Thailand 204
Fedorov M.P., Shilin M.B. Environmental experiences of the first soviet tidal plant in Russian North (Kislaya Bay of the Barents Sea) 209

Information technologies

Istomin E.P., Fokicheva A.A., Korshunov A.A., Slesareva L.S. The management of hydro meteorological risks in socio-economic systems 219

Social science and humanities

Voropaeva I.D., Shilin M.B. Marine spatial planning in the Russian Federation: example of the Baltic Sea area 225
Lazar M.G. Reform of higher education in Russia: results and consequences through the eyes of sociology of education 232
Trubina M.A., Scoryk Y.V., Semova E.K., Tseitlin I.V. Study of adaptation for nonresident students of high school training 245

Chronicle 255
List of authors 261
Terms of publication in the RSHU Proceedings Journal 263

ГЕОФИЗИКА

Е.З. Шнеерсон

О НЕКОТОРЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ДИНАМИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С СУЩЕСТВЕННО НЕИДЕАЛЬНЫМИ СВЯЗЯМИ

E.Z. Shneyerson

ON CERTAIN BASIC DYNAMICAL PROPERTIES OF THE MECHANICAL SYSTEMS WITH STRONGLY NON-IDEAL CONSTRAINTS

Рассмотрен специфический класс задач динамики механических систем, в которых нарушается основополагающая в аналитической механике Лагранжа гипотеза идеальности связей. Приводятся примеры конструктивных методов исследования, позволяющих учесть неидеальность реальных связей. Проанализированы нестандартные эффекты, сопровождающие движение указанных систем.

Описаны виброударные режимы движения систем с существенно неидеальными связями, отличающиеся многообразием и представляющие значительный интерес как в теоретическом, так и в прикладном отношении.

Ключевые слова: уравнения Лагранжа, существенно неидеальные связи, трение, парадокс Пэнлеве, виброударные движения, косой удар, стесненный удар, перемена направления скольжения, виброударные автоколебания.

The specific class of the mechanical systems is considered. These systems are notable for infringement of ideal constraints hypothesis in Lagrange analytical mechanics. The special scientific methods of real non-ideal constraints examination are discussed. The motion of such systems is accompanied with non-typical effects. The vibroimpact motions of the systems with non-ideal constraints are considered too. Both theoretical and applied importance of these regimes is argued.

Keywords: Lagrange equations, strongly non-ideal constraints, friction, Penleve paradox, vibroimpact motions, glancing collision, straitened collision, change of sliding, vibroimpact auto-oscillations.

Классическая динамика несвободных механических систем основана на гипотезе об идеальности наложенных на систему связей. Именно это предположение является краеугольным камнем формализма Лагранжа, сформулированного великим французским математиком и механиком в его фундаментальном труде «Аналитическая механика» [13]. Использование уравнений Лагранжа второго рода позволило решить необозримое число теоретических и прикладных задач и, естественно, не потеряло своего значения по сей день.

Безусловно, схематизация наложенных на систему связей в виде идеальных позволяет во многих случаях получить достоверные результаты. Однако указанный подход отнюдь не является универсальным, поскольку основополагающая гипотеза часто не согласуется со свойствами реальных связей.

Наличие трения, определяющее неидеальный характер наложенных на систему связей, принципиально усложняет динамическое исследование. В наиболее простых случаях силы трения (касательные реакции) не зависят от параметров движения системы. Эти силы определяются на основе квазистатических зависимостей, устанавливающих соотношение между нормальными и касательными составляющими реакций, и могут быть отнесены к числу задаваемых сил. При исследовании таких систем вполне применим формализм Лагранжа второго рода.

Выделяются два класса систем с трением, в которых касательные реакции зависят от параметров движения. Если при этом влияние сил трения не изменяет качественных свойств движения, то такие системы характеризуются ***слабо неидеальными*** связями. При исследовании динамики этих систем формализм Лагранжа второго рода также применим, но в сочетании с итерационными процедурами. Указанный процесс, в котором в качестве исходного приближения используется соответствующая система с идеальными связями, оказывается сходящимся [7]. Важно отметить, что свойство «слабонеидеальности» определяется не вообще малостью сил трения, а незначительностью их влияния на характер движения. Можно привести примеры механизмов, в которых объективно малое трение значительным образом влияет на их динамику [4, 21]. В некоторых случаях, напротив, большие силы трения практически не изменяют качественных особенностей движения.

Другой класс механических систем характеризуется доминирующим влиянием сил трения на происходящие в них динамические процессы. Это системы с ***существенно неидеальными*** связями, в которых касательные реакции изменяют качественный характер движения. Указанные механические системы отличаются специфическими свойствами и требуют особых подходов при исследовании. Такие исследования проводятся с конца XIX — начала XX вв. (П. Пэнлеве, Е.А. Болотов) [2, 18]. Значительный вклад в изучение динамики систем с трением внесли П. Аппель, Н.Г. Четаев, Г.К. Пожарицкий, В.В. Румянцев и другие [1, 17, 20, 22].

Важную роль сыграла работа Н.В. Бутенина [3]. В ней рассмотрен один из способов разрешения ***парадокса Пэнлеве***, сущность которого состоит в следующем. Формально проинтегрированные (с учетом закона трения Амонтона–Кулона) уравнения движения дают отрицательное значение для нормальной реакции связи [18]. Возникла дилемма: либо опровергнуть указанный закон трения, либо констатировать невозможность движения при определенных начальных условиях, что равносильно нарушению принципа механического детерминизма. В результате развернувшейся в свое время дискуссии, в которой участвовали многие видные ученые, были предложены два варианта разрешения парадокса.

Первый вариант основан на мгновенном («скачкообразном») изменении начальных условий, поскольку исходные условия не согласуются со свойствами неидеальных связей. При этом сохраняется представление об абсолютной жесткости связи, но предполагается возникновение в этой связи импульсной реакции [16]. По выражению Пэнлеве,

«...мы получаем первый пример **соударения без удара** — соударение между двумя телами, которые не толкают друг друга, но взаимно приспосабливают скорости» [18].

Л. Лекорню, Г. Гамель и Л. Прандтль наметили другой путь разрешения парадокса, «защищая» закон Кулона, но рассматривая контактирующие тела как деформируемые, поскольку это соответствует их истинной природе. Заметим, что к классу парадоксов Пэнлеве относится еще один вариант нарушения механического детерминизма — теоретическое существование ***нескольких равноправных движений*** при заданных начальных условиях. Подобная неоднозначность обсуждается в работе [11].

Ряд специфических задач динамики систем с трением рассмотрен Г.К. Пожарицким [17]. Исследуется многообразие возможных вариантов плоского движения одной системы, соответствующих определенным начальным условиям. Частные результаты объединяются на основе введенного вариационного принципа, трактуемого как обобщение принципа Гаусса на динамические системы с неидеальными связями. Заметим, что сфера применимости сформулированного принципа весьма ограничена, поскольку он касается лишь тех систем, для которых нормальные реакции априори известны и не зависят от характера движения.

Представляет интерес другая попытка обобщения принципа Гаусса на системы с неидеальными связями, предпринятая В.В. Румянцевым [20]. При этом силы трения не вводятся явно в функцию принуждения. Указанное основано на допущении, что, несмотря на наличие неидеальных связей, можно выделить множество таких возможных перемещений (так называемых (c)-перемещений), на которых работа сил трения оказывается нулевой. В качестве соответствующих примеров можно указать ряд систем, подчиняющихся совокупности идеальных и неидеальных связей. Формулировка установленного принципа совпадает с классической формулировкой принципа Гаусса (для случая идеальных связей). Существенное отличие состоит в том, что минимизируемая функция принуждения для систем с трением рассматривается только в классе (c)-ускорений.

Отметим, что и ранее осуществлялись попытки расширения общих принципов механики, не содержащих в своих математических формулировках реакций связей, на системы с трением. П. Аппелем был установлен модифицированный принцип Эйлера — Лагранжа для возможных перемещений, ортогональных к реакциям поверхностей с трением [1]. Аналогичный принцип сформулирован Н.Г. Четаевым для возможных перемещений, ортогональных к действительным скоростям точек системы [22]. Некоторые специфические особенности динамики систем с неидеальными связями рассмотрены в работе [9].

Особое место в механике систем с трением занимают задачи, в которых контакт соприкасающихся тел рассматривается не как точечный, а как распределенный. Основа такого подхода была заложена Н.Е. Жуковским, исследовавшим равновесие тел на шероховатой плоскости. Развитие идей, связанных с плоским движением твердого тела при наличии распределенного трения, содержится в малоизвестной монографии Ф.А. Опейко [15]. Исследуются однозначность решения уравнений статики при плоском трении, а также задачи динамики трогания с системы с места в приложении к конкретным инженерным проблемам. Отметим, что знание закономерностей движения системы с распределенным трением позволяет корректно перейти к использованию

интегральных характеристик трения. Именно такие характеристики обычно учитываются при решении задач динамики систем с неидеальными связями.

Оригинальные работы по исследованию проблем динамики систем с трением, связанных с парадоксом Пэнлеве, принадлежат О.П. Жилиной, С.Н. Кожевникову, Ле Суан Аню, Ю. И. Неймарку и Н.А. Фуфаеву [8, 10, 12, 14].

Особый раздел механики представляют исследования нелинейных динамических систем, обладающих (ввиду присутствия зазоров) разрывными характеристиками, — так называемых ***виброударных систем***. Их отличительной особенностью является скачкообразное изменение фазовых переменных в моменты переключения режимов. В большинстве работ соударение трактуется как коллинеарное, когда контактирующие элементы движутся вдоль некоторой прямой как до, так и после взаимодействия. Однако существует обширный класс систем с ударными парами, в которых реализуется косое или даже пространственное соударение. При этом возникают касательные ударные импульсы, для описания которых приходится вводить те или иные допущения о характере ударного трения. Особенности удара с трением и связанные с этим эффекты прекращения и изменения направления скольжения рассматривались еще Э.Дж. Раусом [19], Г. Дарбу, А. Майером и др.

Указанные идеи получили бурное развитие в современных исследованиях. При этом ударные взаимодействия с трением в ряде случаев осложняются наличием дополнительных удерживающих связей. Поэтому возникает особый тип удара, называемый обычно *стесненным*. В результате реализации такого процесса выявляется значительная совокупность нестандартных динамических свойств (многообразие режимов соударения, отличающихся различными кинематическими закономерностями, прекращение и смена направления скольжения при ударе, «сверхвосстановление» относительной скорости звеньев, возникновение ***виброударных автоколебаний*** и так далее). Указанные явления подробно изучены в трудах профессора В.Л. Вейца и его сотрудников (в том числе, автора) [5, 6, 23], а также иностранных ученых [24, 25]. Использованная в указанных исследованиях *стереомеханическая модель* стесненного удара с трением представляется плодотворной и позволяет получить новые важные результаты и в теоретическом, и в прикладном направлении.

Литература

1. *Аппель П.* Теоретическая механика. Т. 2. — М.: Физматгиз, 1960. — 487 с.
2. *Болотов Е.А.* О движении материальной плоской фигуры, стесненной связями // Матем. сб. 1906. Т. 25. — С. 17–23.
3. *Бутенин Н.В.* Рассмотрение «вырожденных» динамических систем с помощью гипотезы «скачка» // ПММ. 1948. Т. 12. Вып.1. — С. 3–22.
4. *Вейц В.Л.* Динамика машинных агрегатов. — Л.: Машиностроение. 1969. — 370 с.
5. *Вейц В.Л., Васильков Д.В., Гидаспов И.А., Шнеерсон Е.З.* Динамика приводов технологических машин с самотормозящимися механизмами. — СПб.: Изд-во СПб ИМАШ, 2003. — 162 с.
6. *Вейц В.Л., Шнеерсон Е.З.* Об одной обобщенной модели ударного взаимодействия в самотормозящейся системе // Пробл. машиностр. и надежн. машин. 2000. № 1. — С. 16–22.
7. *Гидаспов И.А., Вейц В.Л.* Динамика самотормозящихся механизмов. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. — 144 с.
8. *Жилина О.П.* К динамике систем с трением / Тр. XXIV школы-семинара «Анализ и синтез нелинейных механических систем». — СПб.: ИПМаш РАН, 1997. — С. 338–350.

9. *Иванов А.П.* О корректности основной задачи динамики в системах с трением // ПММ. 1986. Т. 50. Вып. 5. — С. 712–716.
10. *Кожевников С.Н.* О парадоксах Пэнлеве // Прикл. механика. 1967. Т. 3. Вып. 1. — С. 119–126.
11. *Леви-Чивита Т., Амальди У.* Курс теоретической механики. Т. 2. Ч. 2. — М.: ИЛ, 1951. — 555 с.
12. *Ле Суан Ань.* Динамика систем с кулоновым трением (теория и эксперимент). — СПб.: Нестор, 1999. — 300 с.
13. *Лойцянский Л.Г., Лурье А.И.* Курс теоретической механики. Т. 2. — М.: Наука, 1983. — 640 с.
14. *Неймарк Ю.И., Фуфаев Н.А.* Парадоксы Пэнлеве и динамика тормозной колодки // ПММ. 1995. Т. 59. Вып. 3. — С. 366–375.
15. *Опейко Ф.А.* Математическая теория трения. — Минск: Наука и техника, 1971. — 152 с.
16. *Парс Л.А.* Аналитическая динамика. — М.: Наука, 1971. — 636 с.
17. *Пожарицкий Г.К.* Распространение принципа Гаусса на системы с сухим трением // ПММ. 1961. Т. 25. Вып. 3. — С. 391–406.
18. *Пэнлеве П.* Лекции о трении. — М.: Гостехиздат, 1954. — 316 с.
19. *Раус Э.Дж.* Динамика системы твердых тел. Т. 1. — М.: Наука, 1983. — 464 с.
20. *Румянцев В.В.* О системах с трением // ПММ. 1961. Т. 25. Вып. 6. — С. 969–977.
21. *Турпаев А.И.* Самотормозящиеся механизмы. — М.: Машиностроение, 1976. — 208 с.
22. *Четаев Н.Г.* О некоторых связях с трением // ПММ. 1960. Т. 24. Вып. 1. — С. 35–38.
23. *Шнеерсон Е.З.* О стесненных ударных взаимодействиях в существенно нелинейных динамических системах // Тр. XVIII Межд. симпоз. «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем». — М.: ИМАШ РАН, 2015. — С. 311–315.
24. *Brach R.M.* Friction restitution and energy loss in planar collision // Journal of Applied Mechanics, vol. 51, iss. 1, p. 164–170. — DOI:10.1115/1.3167562.
25. *Stronge W.J.* Rigid body collisions with friction // Proceedings of the Royal Society A, 1990, vol. 431, iss. 1881, p. 169–181. — DOI:10.1098/rspa.1990.0125.

ГИДРОЛОГИЯ

Н.Б. Барышников, Д.И. Исаев, М.С. Дрегваль, И.С. Гаврилов

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РУСЛОВЫХ И ПОЙМЕННЫХ ПОТОКОВ

N.B. Baryshnikov, D.I. Isaev, M.S. Dregval, I.S. Gavrilov

INTERACTION CHANNEL AND FLOODPLAIN FLOWS

Изложена методика расчетов средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков, находящихся под воздействием потоков поймы. Она основана на методике А.В. Караушева, разработанной для потоков в руслах простых форм сечения, и учете эффекта взаимодействия русловых и пойменных потоков. Выполнена оценка зоны воздействия руслового потока на пойменные. Установлено, что ширина этой зоны находится в зависимости от шероховатости поверхности поймы.

Ключевые слова: средняя на вертикали скорость, эффект взаимодействия потоков, методика, формула Шези, угол α, русловая составляющая, погрешность расчетов.

An approach to computing the average velocities of flow in a vertical profile, which are impacted by the floodplain currents, is presented. This approach is based on A. Karaushev's method that was developed for description of currents in channels with simple cross-section's shapes taking into account the riverbed and floodplain flows interaction. Dimensions of the zone of influence of the riverbed flow component onto the floodplain flows were estimated. It was found that the width of this zone depends on the roughness of the floodplain surface.

Keywords: average velocity on the measuring vertical, effect of the flows interaction, approach, Chezy equation, angle α, riverbed component, computational error.

Известно [1, 2, 6], что особенности морфологического строения участка расположения расчетного морфоствора определяют гидравлику потоков в руслах с поймами. Именно это позволило разработать типизации процессов взаимодействия русловых и пойменных потоков. В частности, в РГГМУ [1, 3] была разработана типизация, основанная на учете морфологических особенностей строения участка, расположенного ниже расчетного створа. В ней выделено пять типов взаимодействия потоков (рис. 1). Как видно на рисунке, в качестве основного фактора принято расположение динамических осей взаимодействующих потоков относительно друг друга. В то же время направление динамических осей этих потоков определяется направлением геометрических осей русла и поймы. Не останавливаясь на детальном анализе этой типизации, так как он выполнен в ряде работ [1, 5, 6 и др.], отметим лишь, что средние скорости

русловых потоков при воздействии на них пойменных потоков могут существенно отличаться от аналогичных, но определенных по методике, основанной на допущении о равномерности движения потоков, то есть на основе формулы Шези.

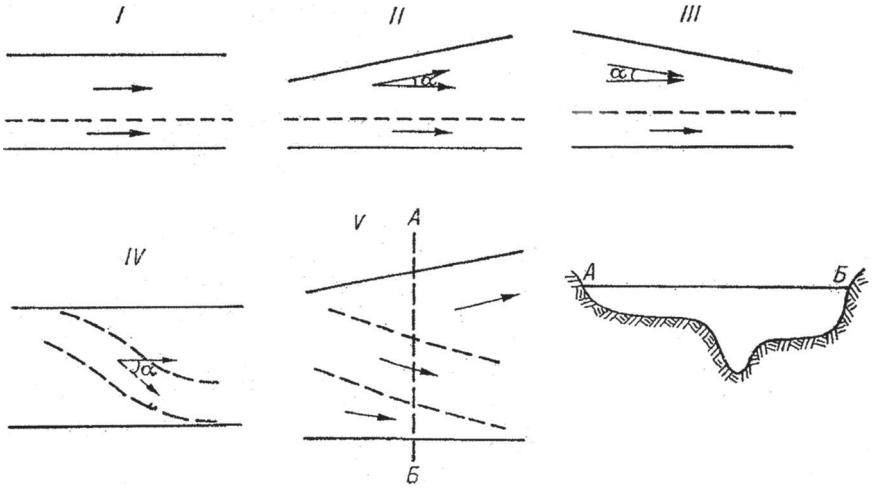


Рис. 1. Схема типизации процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков:
I–V — типы взаимодействия руслового и пойменного потоков

Анализ натурной информации по более, чем пятидесяти рекам бывшего Советского Союза позволил получить зависимость для расчетов средних скоростей русловых составляющих потоков от средних глубин и углов α [1, 5 и др.] вида (рис. 2)

$$\frac{v_{\text{р}}}{v_{\text{р.б.}}} = f\left(\frac{h_{\text{р}}}{h_{\text{р.б.}}}, \alpha\right),$$

где α — угол между динамическими осями взаимодействующих русловых и пойменных потоков, принят положительным при схождении осей потоков, то есть при третьем их типе, и отрицательным при расхождении осей потоков, то есть при втором их типе; v и h — соответственно средние скорости и глубины русловых потоков; р и р.б. означают, что значения параметров относятся к русловым составляющим потоков при расчетном «р» уровне и «р.б.» — уровне затопления бровки прирусловых валов.

Как видно на рис. 2, средние скорости русловых потоков при изменении глубин и углов α могут увеличиваться в несколько раз при втором типе взаимодействия потоков и, наоборот, уменьшаются в разы при третьем, то есть при вторжении пойменных вод в русловой поток. Таким образом, характер изменения средних скоростей русловых составляющих потоков при изменении глубин и углов α зависит от особенностей морфологического строения участка расположения морфоствора. При воздействии пойменного потока изменяется не только величина средних скоростей русловых потоков, но и средних на вертикалях скоростей. Более того, как правило, наблюдается смещение максимума этих скоростей в сторону, противоположную пойме.

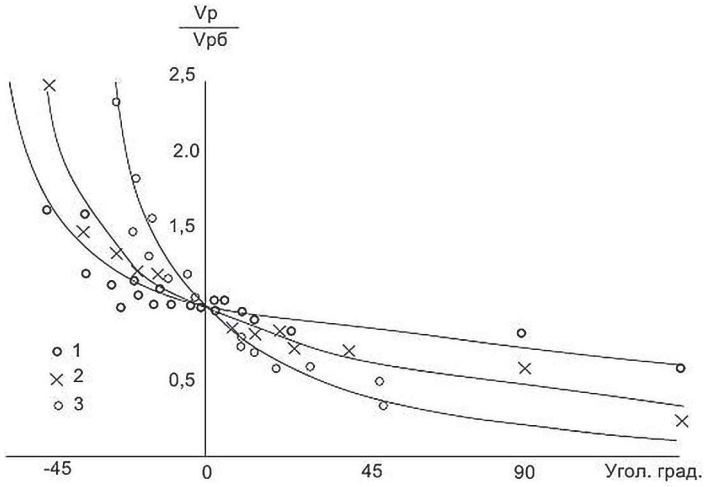


Рис. 2. Кривые $v_р/v_{р.б.} = f(h_р/h_{р.б.}, \alpha)$:
1 — $h_р/h_{р.б.} = 1{,}10$; *2* — $h_р/h_{р.б.} = 1{,}25$; *3* — $h_р/h_{р.б.} = 1{,}50$

Одним из первых это выявил В.Н. Гончаров [4] на основе анализа данных экспериментальных исследований на моделях русла с односторонними и двухсторонними поймами, выполненными из бетона (рис. 3). Как видно на рисунке, при первом и третьем типах взаимодействия потоков наблюдается не только уменьшение средних скоростей русловых составляющих потоков, но и смещение максимумов средних на вертикалях скоростей в сторону, противоположную пойме (рис. 3, *II*, *III*). Более сложная структура скоростного поля руслового потока наблюдается при двухсторонней пойме (рис. 3, *IIIa*). Хотя средняя скорость потока тоже уменьшается, но максимальная скорость находится почти посередине сечения.

Существенно отлична структура руслового потока при втором и четвертом типах взаимодействия потоков (рис. 3, *IV*). При односторонней пойме (рис. 3, *IV*) уменьшения скоростей не наблюдается. При двухсторонней пойме происходит смещение максимума скоростей в сторону поймы, на которой пойменный поток движется с большими скоростями (рис. 3, *IVa*).

Даже предварительный анализ лабораторных данных позволяет считать, что под воздействием пойменного потока происходит трансформация скоростного поля руслового потока. Более четко эта трансформация проявляется при анализе, к сожалению, ограниченного объема натурных данных [1, 2, 3]. Подробное изучение этих данных позволил установить, что на малых и средних реках трансформация скоростного поля руслового потока происходит по всей его ширине, а на больших, таких как Амур, Обь, Волга и других, она затрагивает только часть припойменного руслового потока [1, 2, 3].

В качестве примера рассмотрим трансформацию поля скоростей руслового потока под воздействием пойменного потока при больших углах схождения (рис. 4 и 5) динамических осей потоков ($\alpha \approx 50$ и 30°).

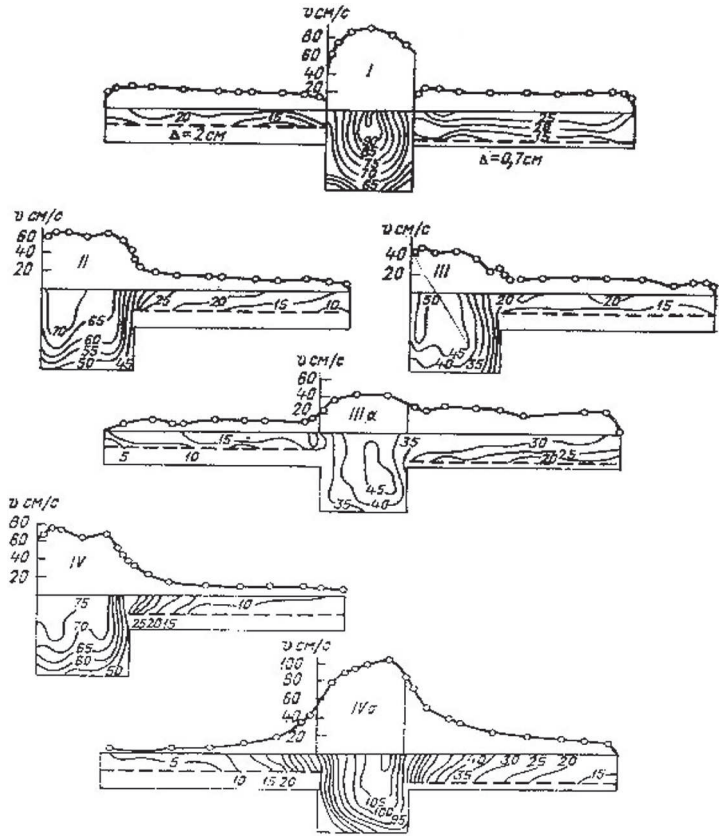


Рис. 3. Поля скоростей потоков в руслах с поймами
при различных типах взаимодействия (по данным экспериментов при $h_р$ = 9 см):
I — изолированные русло и поймы; *II* — первый тип взаимодействия потоков;
III и *IIIa* — перетекание из пойм в русло; *IV* и *IVa* — перетекание из русла в поймы

Как видно на рис. 4, где приведены кривые распределения по ширине средних на вертикалях скоростей русловой составляющей потоков, полученные, как по данным измерений при различных, в том числе и наибольших уровнях, так и на основе результатов расчетов по методике А.В. Караушева [7], основанной на формуле Шези, последняя кривая резко отклоняется в сторону завышения от аналогичной, полученной по данным измерений при наивысшем уровне (805 см). Величины этих отклонений достигают 370 %.

Аналогичная картина имеет место и на других реках, например на р. Конде у дер. Чантырья (рис. 5), на р. Бобр у с. Куты и др. Однако на ряде рек этой группы (табл. 1), где углы схождения динамических осей потоков русла и поймы малы, наблюдается существенно отличная картина изменения скоростей руслового потока под влиянием пойменного.

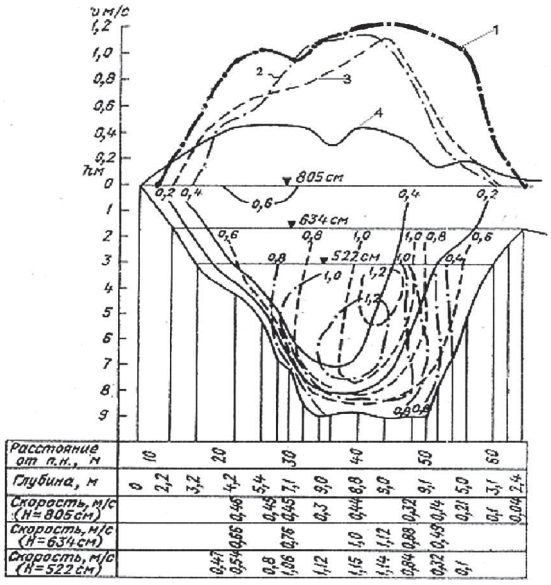


Рис. 4. Профиль поперечного сечения с изотахами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Ветлуги – д. Быстри: *1* — расчетная кривая по формуле Шези при уровне 805 см; данные натурных измерений 1968 г. при уровнях: *2* — 522 см, *3* — 634 см, *4* — 805 см

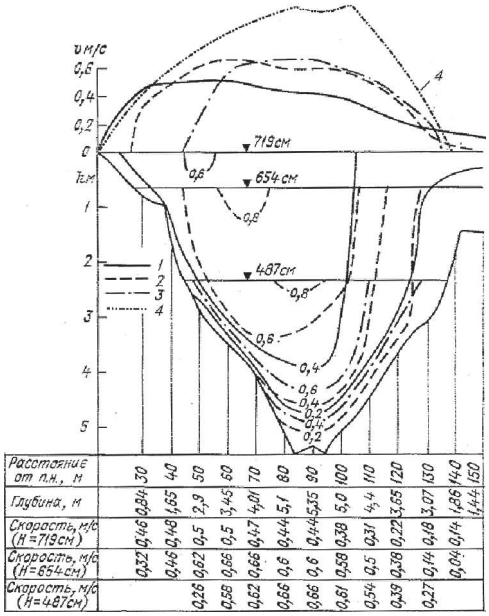


Рис. 5. Профиль поперечного сечения с изотахами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Конда – д. Чантырья. Данные измерений 1966 г. при уровнях: *1* — 719 см, *2* — 654 см, *3* — 487 см, *4* — расчетная эпюра при уровне воды 718 см

Для разработки методики расчетов средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков был использован, к сожалению, ограниченный объем натурной информации, а именно сведения об измеренных детальным способом расходах воды на пойменных створах при наивысших уровнях, когда пойма была затоплена. Использованы следующие данные по десяти рекам, находящимся на территории бывшего Советского Союза. На шести из них процесс взаимодействия потоков осуществлялся по третьему типу на двух — по пятому и на одном по второму (табл. 1). Следует отметить, что информация по р. Луге использовалась для оценки надежности расчетных зависимостей.

На основе данных о максимальных расходах воды и площадях поперечного сечения при соответствующих уровнях воды были определены средние скорости русловых составляющих потоков,

$$\overline{v} = \frac{Q}{F} = C\sqrt{\overline{h}I} = \frac{\overline{h}^{2/3} I^{1/2}}{n},$$

где C — коэффициент Шези; $\overline{h}$ — средняя глубина; I — уклон водной поверхности; n — коэффициент шероховатости.

Учитывая, что уклоны водной поверхности либо не измеряются, либо погрешности их измерений велики, да и точность определения коэффициентов шероховатости низкая, было решено принять $I^{1/2}/n = \beta$. Тогда $\bar{v} = \beta\bar{h}^{2/3}$. Отсюда $\beta = \bar{v}/(\bar{h}^{2/3})$. Далее было сделано допущение, основанное на разработках отечественных исследователей [2, 4 и др.], о том, что коэффициент β может быть так же применен к расчету средних на вертикалях скоростей потоков, то есть

$$v_i = \beta h_i^{2/3}.$$

Здесь v_i и h_i — средние на вертикалях скорости и глубины русловых составляющих потоков. По этой методике были рассчитаны средние на вертикалях скорости v_{pi} при наивысших расходах воды и на основе натурных данных определены погрешности их расчетов $\Delta v_i = v_{изм\,i} - v_{pi}$ и $\Delta v_i / v_{изм\,i}$ %. Следует отметить, что максимальные расходы, как правило, не измеряются особенно на пойменных створах, а рассчитываются либо статистическими методами, либо по данным измерений параметров морфостворов. В частности, коэффициент β может быть определен по приведенному выше выражению, то есть $\beta = I^{1/2}/n$. При этом значения n и I определяются по данным полевых измерений, в частности по описанию участка расположения морфоствора и соответствующим таблицам для определения коэффициентов шероховатости (И.Ф. Карасева, В.Т. Чоу и др.).

Учитывая, что в расчетах были использованы данные измерений расходов воды детальным способом, при котором скоростные вертикали располагались через равные интервалы, то для каждого расчетного створа были вычислены средние и максимальные значения погрешностей. Полученные по этой методике значения погрешностей расчетов приведены в табл. 1. Эти погрешности в основном вызваны изменением значений средних на вертикалях скоростей русловых потоков под воздействием на них пойменных потоков, то есть возникновения при этом эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков [1, 5], а также учитывают погрешности измерений.

Таблица 1

Сведения о величинах средних и максимальных погрешностей расчетов средних на вертикалях скоростей русловых потоков при их взаимодействии с потоками поймы при третьем – пятом их типах, на основе методики Шези – Маннинга

№ п/п	Река, пост	Тип взаимодействия	Угол α, °	Погрешности расчетов, %	
				$(\Delta v/v_{изм})_{ср}$	$(\Delta v/v_{изм})_{макс}$
1	р. Ветлуга – д. Быстри	III	50	215	373
2	р. Ветлуга – д. Дубники	III	3	23,1	81,5
3	р. Конда – д. Чантырья	III	30	130	183
4	р. Амур – д. Кумара	III	4	9,5	23
5	р. Крыловка – д. Крыловка	V	9	84	109
6	р. Нестеровка – рзд. Таловый	V	22	145	311
7	р. Пьяна – д. Камкино	II(IV)	−45	30,2	35,3

Учитывая, что объем натурной информации при третьем и, особенно, при втором типах взаимодействия потоков ограничен, в качестве дополнительных были использованы данные измерений расходов воды при четвертом и пятом типах, процесс взаимодействия которых на этих реках преимущественно происходит по третьему типу. При этом осредненные значения угла $\overline{\alpha}$ между динамическими осями взаимодействующих по пятому типу потоков определялись по формуле

$$\overline{\alpha} = \frac{\sum \Delta h_i \alpha_i}{h_i}.$$

Здесь Δh_i — интервал глубин соответствующий значению угла α_i.

На основе информации, приведенной в табл. 1, были построены графические зависимости $(\Delta v/v_{изм})_{ср} = f(\alpha)$ и $(\Delta v/v_{изм})_{макс} = f(\alpha)$, приведенные на рис. 1. Как видно на рисунке, эти зависимости достаточно тесные и близки к линейным. Коэффициенты корреляции для них, соответственно, равны 0,80 и 0,69.

Безусловно, эти зависимости нуждаются в уточнении на основе большего объема исходной информации и после этого вполне могут быть использованы для корректировки значений средних на вертикалях скоростей, рассчитанных на основе методики А.В. Караушева [7]. Таким образом, методика расчетов предлагается в следующем виде. По планово-высотным крупномасштабным материалам определяют угол α и тип взаимодействия потоков. Методика определения угла α основана на работах отечественных исследователей [1, 5], доказавших, что угол α может быть определен по крупномасштабным планово-высотным материалам как угол между осредненными направлениями изобат в русле реки и горизонталей на пойме при отметке расчетного уровня воды. При этом точность определенного таким образом угла α будет составлять ±3° [5]. По значению угла α и графику $(\Delta v/v)_{изм} = f(\alpha)$ определяют (рис. 6) величину погрешности расчетов $(\Delta v/v_{изм})_{ср}$, обозначим ее m, то есть

$$\left(\frac{\Delta v}{v_{изм}}\right)_{ср} = m,$$

которая приравнивается величине изменения скоростей руслового потока под влиянием потока поймы. По величине m определяется значение $v_{изм}$, исходя из формулы

$$m = \frac{v_{изм} - v_р}{v_{изм}}.$$

После простейших преобразований получают

$$v_{изм} = v_р (m - 1).$$

Здесь $v_р$ — соответствующее значение средней на вертикали скорости руслового потока, определенной по методике А.В. Караушева, то есть на основе допущения о равномерном движении.

Таким образом, по предлагаемой методике, основанной на введении поправок к рассчитанным по формуле Шези – Маннинга значениям средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков, получается близкое к фактическому значение этих скоростей. К сожалению, контрольные расчеты были выполнены по данным только одной реки Луги у пос. Толмачево. Погрешность расчетов составила 15 % против 56 % по методике, основанной на формуле Шези – Маннинга.

Зависимости, аналогичные приведенным на рис. 6, можно получить как для второго типа взаимодействия потоков, так и для пойменных вертикалей.

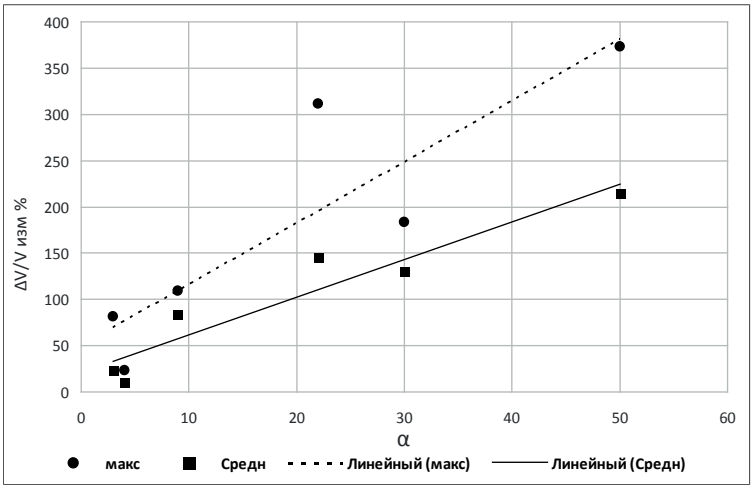


Рис. 6. Зависимости средних и максимальных погрешностей расчетов средних на вертикалях скоростей русловой составляющей потока от углов α (III и V типы взаимодействия потоков)

К сожалению, качество натурной информации о пойменных составляющих максимальных расходов воды низкое. При сложном рельефе и большей, чем в русловой части, ширине пойменных потоков количество скоростных вертикалей на пойме, как правило, меньше, чем в русле. Иногда оно ограничивается одной-двумя вертикалями.

Поэтому получить зависимости, аналогичные, приведенным на рис. 6 для пойменной составляющей, в настоящее время не представляется возможным. Несмотря на это можно констатировать, что воздействие руслового потока на скоростное поле пойменного, по данным экспериментальных исследований на абстрактных моделях русел с гладкими поймами, достигает 5–6 ширин руслового потока [5]. Анализ же натурных данных позволяет сделать вывод о том, что это влияние, находясь в зависимости от шероховатости и глубины затопления поймы, распространяется на значительно меньшую ширину пойменного потока. На поймах, интенсивно заросших кустарником и лесом, это влияние ограничивается одной-двумя ширинами руслового потока.

В заключение следует отметить, что это первые шаги в разработке данной расчетной методики. Они выполнены только для условий третьего – пятого типов взаимодействия потоков и то — на ограниченном объеме исходной информации. По-видимому, необходимо провести аналогичные расчеты для условий второго типа взаимодействия потоков, характеризующегося расхождением их динамических осей, а также для пойменных составляющих потоков. Эти расчеты можно будет выполнить только при наличии надежной натурной информации.

Литература

1. *Барышников Н.Б.* Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. — СПб.: РГГМУ, 2012.
2. *Барышников Н.Б.* О некоторых проблемах в гидрологии // Учен. зап. РГГМУ. 2007. № 5. — С. 9–13.
3. *Барышников Н.Б., Субботина Е.С., Бурцев К.С., Поташко Е.А.* Влияние прирусловых валов на процесс взаимодействия русловых и пойменных потоков // Учен. зап. РГГМУ. 2012. № 26. — С. 19–24.
4. *Гончаров В.Н.* Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеоиздат, 1962.
5. *Железняков Г.В.* Пропускная способность русел рек и каналов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
6. *Карасев И.Ф.* Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980.
7. *Караушев А.В.* Речная гидравлика. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969.

А.Ю. Виноградов, Д.А. Догановский

СОСТОЯНИЕ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА МАЛЫХ РЕКАХ

A.Yu. Vinogradov, D.A. Doganovsky

CONDITION OF HYDROMETRIC SUPERVISION ON THE SMALL RIVERS

Приводится анализ состояния дел на государственной гидрометрической сети. Рассматривается реально существующая информация о количестве постов, на которых проводились измерения за водным режимом малых рек Европейской территории СССР. Оценивается качество таких наблюдений.

Ключевые слова: государственная гидрологическая сеть, гидрометрические посты, измеренные расходы воды.

The analysis of a state of affairs on the state hydrometric network is provided. Real-life information on quantity of posts on which measurements behind the water mode of the small rivers of the European territory of the USSR were taken is considered. Quality of such supervision is estimated.

Keywords: the state hydrological network, hydrometric posts, the measured water discharges.

Введение

Вода является одной из главных составляющих всех жизненных процессов, от которой зависит как состояние самой природы, так и вопросы жизнеобеспечения человеческого общества. Причем последнее подразумевает не только наличие необходимого и достаточного количества важнейшего для человека продукта, но и прогнозы поведения водных объектов. А потому исключительно важна правильная оценка их режима. К сожалению, зачастую это делалось и делается с существенными погрешностями, а то и вовсе фиктивно. В этой статье мы коснемся некоторых проблем из области измерений режима водных объектов, а также обработки и публикации данных этих наблюдений.

Все существующие методики расчетов стока, прописанные в СП 33-101 — при наличии данных наблюдений (статистической обработки), при отсутствии данных наблюдений (гидрологической аналогии, генетической теории формирования стока, редукционной формулы и метода предельной интенсивности ливня), основаны на анализе рядов наблюдений. Следовательно, количество и качество наблюдений определяют не только точность расчетов, но и правильность разработки существующих методик.

Количество. В СССР на начало 80-х гг. прошлого века существовало порядка 5478 постов, на которых выполнялись наблюдения за гидрологическим режимом [1, с. 5]. Их описание приведено в соответствующих сборниках [4, 5]. В настоящее время основным источником информации о режиме водных объектов служит государственная гидрологическая наблюдательная сеть. Как следует из официального

доклада руководителя Росгидромета А.В. Фролова «Состояние и тенденции изменения качества вод в Российской Федерации», по состоянию на 1 января 2013 г. она включала в себя 3182 гидрологических поста, из них 2833 речных расходомерных и 349 озерных уровенных гидрологических постов [6].

С другой стороны, по данным «Обзора состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2013 году» [3], представленного ГГИ, на 1 января 2013 г. функционировал 3071 гидрологический пост, из которых 2698 — расходомерных речных и 347 — озерных уровенных гидрологических постов (табл. 1). Уровенные речные посты мы оставляем за скобками данной статьи.

Таблица 1

Количество официально зарегистрированных гидрометрических постов Росгидромета (Госкомгидромета), по данным ГГИ

Наименование	Год							
	1980	1986	1995	2000	2005	2010	2013	2015
Гидрометрические посты, шт.	7083	3967	3037	2708	2731	2715	2698	2160

Различие в данных об официальном количестве постов уже настораживает. Но эта погрешность в 5 % слишком незначительна по сравнению с действительностью. На поверку оказывается, что количество (оставим пока за скобками качество) «существовавших» постов весьма завышено — реально данных наблюдений по описанным и «действующим» постам в ежегодниках гораздо меньше. Надо иметь в виду, что на сегодняшний день единственная объективная информация о режиме водных объектов содержится только в гидрологических ежегодниках.

Для примера возьмем территорию на границе лесной и лесостепной зон бассейна Верхней Волги. Поскольку нас интересуют малые водосборы, то отберем из списка постов Верхне-Волжского бассейна те, площадь водосборов которых не превышает 250 км². Всего в интересующем нас районе по Списку [5] таких постов было выбрано 242. Однако данные об ежедневных расходах в Ежегодниках приведены лишь для 71 из них (29,4 %), остальных просто нет. При этом лишь по 28 из этих 71 постов данные в Ежегодниках полностью соответствуют характеристикам описаний — представлены ежедневные расходы строго по всему периоду существования поста. А это всего 11,5 % от их общего числа (242). В остальных случаях длина рядов, декларированная в Списке, не соответствует представленной в Ежегодниках, где длины рядов меньше, причем нередко значительно.

Далее, в Списке представлено некоторое количество ведомственных постов, существовавших всего несколько лет. Постов с длиной ряда более 10 лет — всего 43 (17,7 % от 242). Из них полных рядов без пропусков и полностью соответствующих описаниям — 21 (8 % от 242).

Предположим, что на таких постах, как Сендега – Покровское, Ёда – Конюшино, Крива – Симаницы и многих других, им подобных, результаты наблюдений первых двух-трех лет после их открытия были признаны недостоверными. Можно

предположить объективные причины: становление и оборудование поста, подбор персонала и проч., а потому данные за первые годы были признаны нерепрезентативными и забракованы.

Допускаем, что вместо декларированного 23-летнего ряда поста Кесьма – Барское Александрово (1936–1958) в Ежегодниках имеются лишь сведения о 8 годах (1951–1958) по причине послевоенной неразберихи. Данные, возможно, были утеряны. По той же причине могут отсутствовать данные, к примеру, поста Ворон – Ямышево, где вместо обещанных в Ресурсах полувековых наблюдений (1938–1988) в Ежегодниках имеются данные лишь за 36 лет (1951–1987).

Но что случилось с постом Белая – Борисково, по которому из 21-летнего обещанного Списком ряда (1954–1974) в Ежегодниках приводятся лишь расходы по произвольно взятым двум (!) годам: 1955 и 1958? Или Большая Маза – Сельская Маза, где из 12-летнего ряда (1955–1966) на всеобщее обозрение выложены лишь 1963 и 1964 годы? Годы-то в истории страны относительно спокойные, а для отечественной гидрологии и вовсе благостные! При этом надо иметь в виду, что если по каким-то причинам публикация данных была тогда отложена, то в настоящее время первичные материалы наверняка полностью утеряны.

Совсем необычная история приключилась с постом Малая Кутра – Городище. Открытый, согласно Ресурсам, в 1945 г., первые данные о расходах в Ежегодники он предоставил в 1948 г. Следующим освещенным годом стал 1950, а потом 1952 г. Далее данные выкладывались ежегодно вплоть до 1957 г. После этого пост из Ежегодников вдруг пропадает, вновь появившись лишь 11 лет спустя, в 1968 г. Причем под названием Малая Кутра – пгт. Вача. По утверждению Ежегодников, это тот же прежний пост, только переименованный. При сравнении описаний предыдущего и нового постов очевидно, что это так и есть. Но куда же все-таки пропали эти 11 лет? И почему декларированный в описаниях 43-летний ряд наблюдений (1945–1987) на деле в Ежегодниках сокращается до 28 лет, да еще и с тремя пропусками (1948, 1950, 1952–1957, 1968–1987)?

После того как с середины 1970-х гг. в Ежегодниках прекратили печатать данные об измеренных расходах, нас, пользователей, сознательно лишили возможности контролировать и оценивать качество представленной информации. Мало кто из пользователей знает, что представленные в Ежегодниках якобы *эмпирические* максимальные расходы на самом деле реально измерялись крайне редко. В настоящее время объяснение этому простое — возраст наблюдателей (преимущественно, пенсионный), отсутствие стимулирования их зачастую крайне опасного труда (к иной реке в хорошей паводок и подойти страшно), резкое ухудшение материально-технической базы постов, устаревшее оборудование. Даже на постах, оборудованных дистанционными установками ГР-70, погрешности измерений в паводок весьма велики — гидрометрический груз используется один и тот же, без учета изменения скорости течения, точность определения глубины на скоростной вертикали не превышает 10–15 %.

В большинстве случаев на обычных постах максимальный расход оценивался постфактум, по меткам высоких вод, и пересчитывался по экстраполированной кривой $Q = f(H)$. В последние десятилетия ординаты этих кривых не уточнялись. Погрешность такого расчета (обычно проводимого без учета возможных местных временных

подпорных явлений), по нашей оценке, составляет 20–50 %, причем чаще всего в сторону завышения.

Кроме того, плотность количества постов от области к области различается на порядок. Обращаем внимание, что все рассматриваемые области бассейна Верхней Волги находятся в центрально-европейской части России, где плотность населения и промышленных объектов (для проектирования и строительства которых могли организовываться посты) близка друг к другу. Следовательно, мы имеем дело с человеческим фактором. Например, в Новгородской области (бассейн р. Невы) даже без учета постов двух водно-балансовых станций (Валдайской и Оксочи, 45 и 8, соответственно) в послевоенные годы работало без малого полсотни постов на малых реках! А в Калужской и Рязанской — 2 и 3 соответственно. Видимо, тогда, как и сейчас, были неравнодушные к своему делу люди — начальники областных управлений гидрометслужбы — но помним ли мы их имена? А ведь страна должна знать своих героев!

Качество. В процессе пересчета площадей 313 малых водосборов на территории центральной части зоны смешанных лесов были выявлены ошибки в прежде определенных площадях, составляющие от 10 до 100 и более процентов. При этом надо учитывать тот факт, что для каждого третьего поста мы не смогли точно оценить площадь водосбора в связи с отсутствием данных о его местоположении и принимали ее без уточнений, то есть ошибок могло быть и больше. Таким образом, площадь водосбора каждой пятой изученной малой реки европейской территории страны определена с погрешностью, превышающей 10 % (табл. 2).

Таблица 2

Ошибки в определении площадей водосборов изученных малых рек Верхне-Волжского, Северо-Западного и Центрального УГМС

Характеристика	Ошибка, %				
	10–25	25–50	50–100	100–1000	>1000
Количество постов	37	11	5	3	1

Ошибки в измерениях максимальных расходов также весьма велики. Примеры: *р. Кесьма–пост Барское Александрово*: река впадает в Рыбинское водохранилище, площадь по Ежегоднику 1951 г. — 275 км², [5] — 248 км², наша оценка — 240 км². Водность (по водному балансу) не соответствует площади, при соотношении площадей между постами с. Барское Александрово и д. Подлесное (площадь [5] — 370 км², наша оценка — 355 км²) 1 : 1,5, соотношение водности составляет 1 : 1,2 (табл. 3).

Таблица 3

Результаты измеренных расходов на одну дату (30.04.1958)

Пост	Площадь, км²	Среднесуточный максимум, м³/с	Измеренный максимум, м³/с
Барское Александрово	248	49,8	63,8
Подлесное	370	59,3	67,4

Более крупная река Желча, впадающая в оз. Чудское: до 1960 г. включительно наблюдения велись на посту в деревне Сиянщина, где площадь водосбора составляла 673 км². С 1960 г. открыт пост в п. Ямм, площадь [4] — 791 км². Данные по среднесуточным расходам половодья за 17 апреля 1960 г. составляли [4] 25 м³/с в Сиянщине и 112 м³/с в п. Ямм, что при соотношении площадей 1:1,18 говорит об ошибке в измерении расхода в 400 %.

Водно-балансовая станция Оксочи, р. Гриденка: благодаря наличию дополнительной информации можно достаточно подробно проанализировать «измеренные» расходы. Рассмотрим выдающийся дождевой паводок 11 и 12 июля 1953 г. Максимальный измеренный слой осадков на эти даты, по наблюдениям на метеоплощадках станции Оксочи, достигал, соответственно, 162 мм и 64 мм!

Мелкий дождь 11 июля шел весь день, к 20 ч слой выпавших осадков составил около 3 мм. С половины девятого до половины одиннадцатого вечера выпало 85 мм осадков, далее до 24 ч еще 35 мм, временами интенсивность достигала 1 мм/мин [2]. Среднесуточная скорость ветра составила 4 м/с. С учетом выдувания и разбрызгивания можно предположить, что максимальный суточный слой осадков местами мог достигать 180 и более мм.

Расход воды на р. Гриденке (площадь водосбора — 8,12 км²) превысил максимальный расчетный для порог-контроля, равный 7 м³/с. Самописец уровня воды был затоплен, правый берег выше сооружения — размыт. Уровень этого паводка определен по меткам высоких вод. По этому уровню пересчитан максимальный мгновенный расход в 11,6 м³/с.

Среднесуточный расход в 4,9 м³/с в 2 раза превышает таковой у соседней Смоличенки (8,0 км²), чье сооружение рассчитано на пропуск расхода 7,04 м³/с.

По реке Оксочка (6,81 км²) также в эти дни проходил сильный паводок, водосливное сооружение на посту было рассчитано на пропуск расхода 9,75 м³/с. Тем не менее паводок не измерен, что объясняется «прохождением расхода, ***в несколько раз*** превышающего расчетный максимальный для водослива» [2].

На рис. 1 приведена кривая падения расхода в течение 12 июля 1953 г.

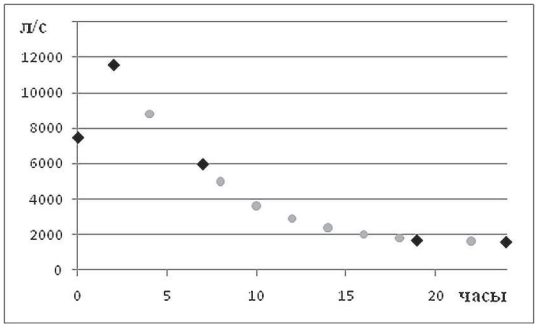


Рис. 1. Кривая изменения расхода воды в р. Оксочка в течение 12.07.1953 г., где черные точки — «измеренные» расходы, серые — интерполированные

Рассмотрим результаты «измерений» расходов на реке Гриденка за 12 июля. Если признать характер изменения расхода на рис. 1 верным, то среднесуточный расход

составит 4,3 м³/с, что отличается от занесенного в таблицу измеренных расходов значения 4,88 м³/с (превышение даже в этом случае на 15 %).

Нам представляется, что вычисленный по косвенным признакам (УВВ) расход на 2 ч ночи (11,6 м³/с) явно завышен. Уже «зафиксированный» в полночь расход в 7,5 кубометров в секунду превышает пропускную способность порог-контроля и не мог быть измерен. Следовательно и эта оценка расхода приблизительная. Дальнейший подъем уровня у водомерной будки и ее размыв объясняются забитым карчами водопропускным отверстием порог-контроля. Скорее всего наблюдатель находился в момент паводка на водомерном сооружении р. Смоличенки, где следил за работой водосброса, сооружения же Гриденки остались без контроля. А среднесуточный расход за 12.07 оценивается нами в 3,0–3,2 м³/с, что меньше официально приведенного в ежегоднике 4,88 м³/с в полтора раза.

Лог Лесной Подмосковной ВБС: при близких слоях осадков, глубине промерзания и дружности половодья (табл. 4), измеренные слои паводков различаются на два порядка!

Таблица 4

Данные слоев паводков весеннего половодья лога Лесной Подмосковной ВБС

Год	Годовой слой осадков, мм	Слой осадков холодного периода, мм	Слой стока весеннего половодья, мм
1955	454	190	91
1965	606	150	1
1985	626	145	42

Следующий пример: р. Волошня является левым притоком реки Рузы, площадь водосбора — 91,2 км². Наша оценка — площадь 85 км².

Таблица 5

Сравнительные суточные максимумы малых рек региона

Характеристика	Река					
	Медвенка	Катыш	Волошня	Лусянка	Лама	Шоша
Площадь водосбора, км²	40	71	85	177	184	339
Максимальный среднесуточный расход весеннего половодья м³/с	5,4	8,4	22,8	44,7	21,5	73,2

Максимальный паводок, зафиксированный в 1968 г. (22,8 м³/с), завышен более чем на треть. Этот факт можно оценить по отношению слоя половодья над эффективным слоем осадков холодного периода — получается, что при общей продолжительности половодья в 24 дня, за одни сутки через замыкающий створ прошла пятая часть всех зимних осадков! Максимальный расход, «измеренный» в этот год на реке Волошня, даже превысил соответствующий расход на р. Лама с площадью водосбора большей в 2,2 раза.

Река Шоша: измеренные среднесуточные максимальные расходы при малых площадях завышены в 1,5 раза (табл. 6). Ситуация выравнивается только при площадях водосбора, больших 1300 км².

Таблица 6

Отношение среднесуточных измеренных расходов к площади водосбора

Река – пункт	Площадь водосбора, км²	Средний максимальный измеренный расход, м³/с	Отношение измеренного к площади
Шоша – Б. Кобяково	101	24,4	0,24
Шоша – Хлопово	339	67,6	0,20
Шоша – Микулино	1320	228	0,17

Представленный анализ погрешностей и ошибок в измерениях и расчетах является лишь частным примером, сделанным на небольшой, взятой фактически в произвольной выборке. Вряд ли стоит сомневаться, что и подавляющее большинство остальных опубликованных данных с других гидрометеорологических постов также нуждается в проверке.

Выводы

Так что же делать? В идеале, конечно, необходим всеобъемлющий критический анализ данных по всем гидрологическим постам за все годы и, как результат, внесение соответствующих правок в уже опубликованные сведения. Понятно, что на данное время этот вариант выглядит утопичным, хотя и жизненно необходимым.

Пока же надо всегда отдавать себе отчет в том, что представленным в ежегодниках и другой справочной литературе данным не стоит доверять слепо. Что возможные ошибки в представленных измерениях и, как следствие, проводимых на основании этих измерений вычислениях, могут составлять до 50 % и более. И для серьезных обобщений, и научных исследований необходима предварительная проверка репрезентативности цифр, на основании которых эти обобщения будут строиться.

Литература

1. *Карасев И.Ф.* Речная гидрометрия и учет водных ресурсов: монография. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — С. 5.
2. *Материалы* наблюдений станции Оксочи. Вып. 3. 1946–1955 гг. — М.: ГУГМС при Совете Министров СССР, 1960. — С. 115.
3. *Обзор* состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2013 году [Электронный ресурс]. — URL: http://www.hydrology.ru/sites/default/files/docs/Publicacii_i_knigi/obzor_seti_2013.pdf
4. *Ресурсы* поверхностных вод. Т. 2, Карелия и Северо-Запад: справочник / под ред. В.Е. Водогрецкого. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972. Т. 1. — С. 5–440; Т. 2. — С. 65–148.
5. *Ресурсы* поверхностных вод: справочник / под ред. Ю.Е. Яблокова. — М.: МО Гидрометеоиздата, 1973. Т. 1. — С. 16, 120; Т. 2. — С. 24–186.
6. *Фролов А.В.* Состояние и тенденции изменения качества вод в Российской Федерации: доклад [Электронный ресурс]. — URL: http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=717

С.М. Гордеева, В.Н. Малинин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ DATA MINING В ЗАДАЧЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

S.M. Gordeeva, V.N. Malinin

USE OF DATA MINING IN HYDROMETEOROLOGICAL FORECASTING

Представлено краткое описание нового метода анализа экспериментальных данных Data Mining и его направления — деревья решений. Показана эффективность использования алгоритма CART для долгосрочного прогноза годового стока р. Северной Двины. Стандартная ошибка прогностических значений стока по независимым данным составляет 0,65 от величины стандартного отклонения фактических значений годового стока.

Ключевые слова: Data Mining, деревья решений, алгоритм CART, прогноз годового стока, Северная Двина.

A brief description of Data Mining and its branch — decision trees as a new method of experimental data analysis is presented. Application of the CART algorithm for the long-term forecast of the annual runoff of the Severnaya Dvina river showed its efficiency. The standard error of the forecast for independent data series on runoff is 0.65 of the value of the annual runoff standard deviation.

Keywords: Data Mining, decision trees, CART algorithm, annual runoff forecast, Severnaya Dvina river.

Дословно Data Mining (discovery-driven data mining) переводится как «добыча» (раскопка) данных. По сути Data Mining — анализ экспериментальных данных с целью поиска неочевидных, объективных и полезных на практике закономерностей. Неочевидных — это значит, что найденные закономерности не обнаруживаются стандартными методами обработки информации или экспертным путем. Объективных — что обнаруженные закономерности будут полностью соответствовать действительности, в отличие от экспертного мнения, которое всегда является субъективным. Полезных — это значит, что выводы имеют конкретное значение, которому можно найти практическое применение [9]. На русском языке этот вид анализа еще не получил устоявшейся терминологии. Data Mining является мультидисциплинарной областью, возникшей и развивающейся на базе достижений прикладной статистики, распознавания образов, методов искусственного интеллекта, нейронных сетей, теории баз данных и др. Отсюда обилие методов и алгоритмов, реализованных в различных действующих системах Data Mining [1, 4, 5, 7, 8, 11, 13, 14].

К методам и алгоритмам Data Mining относятся: искусственные нейронные сети, деревья решений, символьные правила, метод опорных векторов, байесовские сети, линейная регрессия, корреляционно-регрессионный анализ, методы кластерного анализа, методы поиска ассоциативных правил, метод ограниченного перебора,

эволюционное программирование и генетические алгоритмы, разнообразные методы визуализации данных и множество других методов. В связи с этим удобно все многообразие методов Data Mining разделять на две группы: *статистические* и *кибернетические*.

Довольно долго Data Mining не признавалась полноценной самостоятельной областью анализа данных, иногда ее даже называли «задворками статистики» [15]. Однако в настоящее время идет ее интенсивное развитие. В основу современной технологии Data Mining положена концепция шаблонов (паттернов), отражающих фрагменты многоаспектных взаимоотношений в данных. Эти шаблоны представляют собой закономерности, свойственные подвыборкам данных, которые могут быть компактно выражены в понятной человеку форме. Поиск шаблонов производится методами, не ограниченными рамками априорных предположений о структуре выборки и виде распределений значений анализируемых показателей. Важное положение Data Mining — нетривиальность разыскиваемых шаблонов. Это означает, что найденные шаблоны должны отражать неочевидные, неожиданные (unexpected) регулярности в данных, составляющие так называемые скрытые знания (hidden knowledge). К обществу пришло понимание, что сырые данные (raw data) содержат глубинный пласт знаний, при грамотной раскопке которого могут быть обнаружены настоящие самородки [3].

К числу наиболее популярных методов Data Mining принадлежит *метод деревьев решений* (decision trees), который может быть использован в практике многих гидрометеорологических задач, в частности задач классификации и прогнозирования. Если зависимая переменная принимает дискретные значения, то при помощи метода дерева решений решается задача классификации. Если зависимая переменная принимает непрерывные значения, то дерево решений устанавливает зависимость этой переменной от независимых переменных, то есть решает задачу численного прогнозирования. Очевидно, впервые суть решений деревьев была изложена в 1966 г. в работе Ханта и др. [10].

К достоинствам деревьев решений относятся:

- визуализация получаемых результатов и более понятная их интерпретация;
- алгоритм конструирования дерева решений не требует от пользователя выбора независимых переменных. На вход алгоритма можно подавать все переменные, и алгоритм сам выберет наиболее значимые из них, которые в дальнейшем будут использованы для построения дерева;
- большинство алгоритмов конструирования деревьев решений имеют возможность специальной обработки пропущенных значений;
- точность моделей, созданных при помощи решений деревьев, сопоставима с другими методами построения классификационных моделей (статистические методы, нейронные сети);
- деревья решений могут работать с любыми типами исходных данных, как с числовыми, так и с категориальными переменными;
- деревья решений строят непараметрические модели, то есть исходные данные свободны от теоретического распределения.

В наиболее простом виде дерево решений — это способ представления классифицирующих правил в виде иерархической структуры. Ее основой, имеющей вид дерева, являются правила типа «*если... то...*» (*if – then*). Для принятия решения, к какому классу отнести некоторый объект или ситуацию, требуется ответить на вопросы, стоящие

в узлах этого дерева, начиная с его корня. Корень — исходный вопрос, внутренний узел дерева, является узлом проверки определенного условия. Далее идет следующий вопрос и т.д., пока не будет достигнут конечный узел дерева, являющийся узлом решения. Вопросы имеют вид «*значение параметра А больше х?*». Если ответ «да», то осуществляется переход к правому узлу следующего уровня, если «нет» — то к левому узлу; затем снова следует вопрос, связанный с соответствующим узлом.

В соответствии с иерархической природой деревьев ветвления выполняются последовательно, начиная с корневой вершины, затем переходят к вершинам потомков до тех пор, пока дальнейшее ветвление не прекратится и «неразветвленные» вершины потомки окажутся терминальными. Терминальные вершины («листья») — это узлы дерева, начиная с которых никакие решения больше не принимаются. В программе Statistica, например на рисунке дерева, решения терминальные вершины выделяются красными пунктирными линиями, а остальные — так называемые решающие вершины, или вершины ветвления, — сплошными синими линиями. Началом дерева считается самая верхняя решающая вершина, которую иногда также называют корнем дерева.

В программе Statistica [12] предусмотрено три алгоритма ветвления дерева.

Первый алгоритм — *дискриминантное одномерное ветвление* для категориальных и порядковых предикторов (QUEST) — можно использовать, если независимые переменные являются категориальными, порядковыми или смесью обоих типов. При этом под порядковыми переменными понимаются любые количественные переменные.

Второй алгоритм — *дискриминантное ветвление по линейным комбинациям порядковых предикторов* — можно применять, если для анализа выбраны только порядковые переменные.

Третий алгоритм — *полный перебор для одномерных ветвлений* методом C&RT (CART) — можно использовать для категориальных, порядковых или смеси обоих типов независимых переменных. По сравнению с предыдущими методами ветвления в этом методе для нахождения наилучшего варианта выполняется последовательный перебор всех возможных комбинаций независимых переменных. В связи с тем, что количество вариантов для такого перебора может оказаться очень большим, вычисления могут занять много времени, вследствие чего дерево решений окажется достаточно сложным.

Процесс создания дерева происходит сверху вниз, то есть является нисходящим. Алгоритмы конструирования деревьев решений состоят из этапов «построение», или «создание», дерева (tree building) и «сокращение» дерева (tree pruning). В ходе создания дерева решаются вопросы выбора критериев расщепления (разбиения), ветвления и остановки обучения. При сокращении дерева решается вопрос определения подходящего размера дерева, то есть отсечения некоторых его ветвей. Впрочем, деление на отдельные этапы во многом условно, поскольку некоторые алгоритмы выполняют построение дерева и его сокращение последовательно, а другие — чередуют их в процессе своей работы для предотвращения наращивания внутренних узлов.

Критерий расщепления требуется для того, чтобы разбить множество на однородные подмножества, которые должны быть связаны с данным узлом. Каждый узел помечается определенным атрибутом. Существует правило выбора атрибута: он должен разбивать исходное множество данных таким образом, чтобы объекты подмножеств, получаемых в результате этого разбиения, являлись представителями одного класса

или же были максимально приближены к такому разбиению. Это означает, что в каждом классе количество инородных объектов из других классов («примесей») должно быть минимальным.

Существуют различные критерии расщепления [3]. Наиболее известные — мера энтропии и индекс *Gini*. Мера энтропии в некоторых алгоритмах известна под названием «мера информационного выигрыша» (information gain measure). Другой критерий расщепления реализован в алгоритме CART (Classification and Regression Tree). Как видно из названия, он решает задачи классификации и регрессии. Алгоритм был разработан в 1974–1984 гг. четырьмя профессорами статистики ведущих американских университетов: Л. Брейманом, Д. Фридманом, Ч. Стоуном и Р. Олшеном [6]. В алгоритме CART в качестве критерия расщепления используется индекс *Gini*. При помощи этого индекса атрибут выбирается на основании расстояний между распределениями классов. Индекс *Gini* определяется по формуле

$$Gini(T) = 1 - \sum_{j=1}^{n} p_j^2, \qquad (1)$$

где T — текущий узел; p_j — вероятность класса j в узле T; n — количество классов.

Данная оценочная функция основана на идее уменьшения неопределенности в узле. Допустим, есть узел, и он разбит на два класса. Максимальная неопределенность в узле будет достигнута при разбиении его на два подмножества по 50 примеров, а максимальная определенность — при разбиении на 100 и 0 примеров.

Алгоритм CART предназначен для построения бинарного дерева решений. Бинарные деревья также называют двоичными. Каждый узел бинарного дерева при разбиении имеет только двух потомков, называемых дочерними ветвями. Дальнейшее разделение ветви зависит от того, много ли исходных данных описывает данная ветвь. На каждом шаге построения дерева правило, формируемое в узле, делит заданное множество примеров на две части. Правая его часть (ветвь right) — это та часть множества, в которой правило выполняется; левая (ветвь left) — та, для которой правило не выполняется.

Важно, что алгоритм CART работает как с числовыми, так и с категориальными атрибутами. В каждом узле разбиение может идти только по одному атрибуту. Если атрибут является числовым, то во внутреннем узле формируется правило вида $x_i <= c$. Значение c в большинстве случаев выбирается как среднее арифметическое двух соседних упорядоченных значений переменной x_i обучающего набора данных. Если же атрибут относится к категориальному типу, то во внутреннем узле формируется правило $x_i < V(x_i)$, где $V(x_i)$ — некоторое непустое подмножество множества значений переменной x_i в обучающем наборе данных.

С точки зрения качества получаемых результатов, весьма важной представляется оценка точности распознавания. В методе decision trees наиболее точной классификацией считается та, которая связана с наименьшей ценой. При этом *под ценой понимается доля неправильно классифицированных объектов*. Под неправильной классификацией понимается ошибочное отнесение объекта, принадлежащего одному классу, в другой класс. Очевидно, что самым лучшим прогнозом будет тот, который дает наименьший процент неправильных классификаций.

В модуле *Деревья классификации* программы Statistica [12] предусмотрено два варианта задания цены неправильной классификации объектов: *Равные* и *Пользовательские*. В первом варианте, когда цены берутся одинаковые, все внедиагональные элементы матрицы цен ошибок классификации (прогнозируемые классы — по строкам, наблюдаемые классы — по столбцам) полагаются равными 1. Второй вариант соответствует случаю, когда по каким-либо причинам для одних классов требуется более точный прогноз, чем для других. Наиболее просто это можно учесть путем придания «важным» классам больших «весов», чем остальным.

В рамке *Априорные вероятности* нужно указать способ вычисления априорных вероятностей, то есть задать вероятность того, что объект будет принадлежать определенному классу даже при отсутствии какой-либо априорной информации о значениях независимых переменных. Если при этом априорные вероятности выбраны пропорциональными численности классов, а цена ошибки классификации является одинаковой для всех классов, то минимизация потерь будет в точности эквивалентна минимизации доли неправильно классифицированных наблюдений. Отметим, что выбор априорных вероятностей, используемых для минимизации потерь, очень сильно влияет на результаты классификации. Если различия между исходными частотами в данной задаче не считаются существенными или если мы заранее знаем, что классы содержат примерно одинаковое количество наблюдений, то тогда можно взять одинаковые априорные вероятности, что соответствует опции *Равные*. Если исходные частоты связаны с размерами классов, то следует в качестве оценок для априорных вероятностей взять относительные размеры классов в выборке опция *Оцениваемые*. Наконец, если мы располагаем какой-то информацией об исходных частотах, то априорные вероятности нужно выбирать с учетом этой информации в опции *Пользовательские*.

Весьма сложным и неоднозначным является вопрос остановки ветвления дерева, который одновременно можно рассматривать также с точки зрения определения подходящего размера дерева. Вообще говоря, понятно, что, чем больше размерность дерева классификации, тем точнее прогноз, но одновременно сложнее интерпретация результатов и решающие правила, поэтому пользователю труднее сделать прогноз о принадлежности к классу нового объекта. В связи с этим можно лишь высказать ряд общих соображений о том, что следует считать «подходящими размерами» для дерева классификации. С одной стороны, дерево классификации должно быть достаточно сложным, чтобы учитывать имеющуюся информацию, а с другой — оно должно быть как можно проще, с точки зрения интерпретации получаемых результатов. Такие взаимоисключающие требования к дереву приводят к необходимости введения каких-либо критериев оптимальности, позволяющих максимальным образом учитывать эти требования.

Отметим также, что дерево должно уметь использовать ту информацию, которая улучшает точность прогноза, и игнорировать информацию, которая прогноз не улучшает. Одна из возможных стратегий выбора размера дерева состоит в том, чтобы наращивать его до нужного размера, который определяется самим пользователем на основе имеющихся данных, выданных на предыдущих этапах анализа или, в крайнем случае, на основе интуиции. В принципе, если не установлено ограничение на число ветвлений, то можно прийти к «чистой» классификации, когда каждая терминальная

вершина содержит только один класс наблюдений (объектов). Следует также иметь в виду, что привлекаемые к классификации исходные данные содержат ошибки измерений, причем степень «засоренности» ими выборки, как правило, не известна. Поэтому нецелесообразно осуществлять сортировку до тех пор, пока каждая терминальная вершина станет «чистой».

Алгоритм CART принципиально отличается от других алгоритмов конструирования деревьев решений механизмом, имеющим название minimal cost-complexity tree pruning. В рассматриваемом алгоритме отсечение — это некий компромисс между получением дерева «подходящего размера» и получением наиболее точной оценки классификации. Метод заключается в получении последовательности уменьшающихся деревьев, но деревья рассматриваются не все, а только их «лучшие представители».

В модуле CART программы Statistica [12] на вкладке *Параметры остановки* реализованы два варианта остановки: *По отклонению* и *Прямая остановка (FACT)*. По первому правилу отсечения ветви дерева последовательно «отсекаются» от полного дерева классификации. Затем дерево классификации «подходящего размера» выбирается из «усеченных» деревьев с помощью специального правила стандартной ошибки. При выборе этого правила в рамке *Условия остановки* активизированы опции *Максимальное n* (число узлов) дерева и *Минимальное число случаев* на вершине (листе), при помощи которых пользователь может управлять моментом остановки ветвлений дерева.

В правиле *Прямая остановка по методу FACT* используется совершенно иной подход. Здесь полное дерево классификации, содержащее все возможные ветвления, рассматривается как имеющее «подходящий размер». При этом правиле надо определить момент прекращения ветвлений, задавая в рамке *Условия остановки* значение параметра, имеющего название *Доля неклассифицированных объектов*. В этом случае ветвление по независимым переменным будет продолжаться до тех пор, пока каждая терминальная вершина дерева классификации не станет «чистой» или количество отнесенных к этой вершине объектов из одного или нескольких классов не станет меньше заданной доли от общей численности соответствующего класса (классов).

Стратегия выбора «подходящего размера» для дерева — метод автоматического построения дерева по Брейману [6], который реализован в виде *кросс-проверочного отсечения* по *минимальной цене-сложности*, либо по *минимальному отклонению-сложности*. Единственное различие между этими способами — метод измерения ошибки прогноза. При первой опции используется функция потерь, равная доли неправильно классифицированных объектов при оцениваемых априорных вероятностях и одинаковых ценах ошибок классификации. При второй опции используется мера, основанная на принципе максимума правдоподобия. Для того чтобы в модуле деревья классификации выполнить кросс-проверочное отсечение по минимальной цене-сложности, нужно выбрать правило остановки по ошибке классификации. Кросс-проверочное отсечение по минимальному отклонению-сложности выполняется, если выбрано правило остановки по отклонению.

Кросс-проверка определяется путем расчета доли неправильно классифицированных объектов на независимой выборке (цена кросс-проверки, *CV-cost*). В модуле CART программы Statistica [12] — настраивается на вкладке *Проверка*, где предусмотрено два способа выбора независимой выборки:

1. *Кросс-проверка на тестовой выборке* — наиболее предпочтительный вариант кросс-проверки. В этом варианте дерево классификации строится по исходной обучающей выборке, а его способность к прогнозированию проверяется путем предсказания классовой принадлежности элементов по независимой (тестовой) выборке. Если значение цены по независимой выборке окажется больше, чем по обучающей выборке, то это свидетельствует о плохом результате кросс-проверки. Возможно, в этом случае следует поискать дерево другого размера, которое бы лучше выдерживало кросс-проверку. Независимая и обучающая выборки могут быть сформированы, например, путем деления исходной выборки на две не обязательно равные части.
2. *V-кратная кросс-проверка*. Этот вид кросс-проверки целесообразно использовать в случаях, когда в распоряжении пользователя нет отдельной тестовой (независимой) выборки, а обучающее множество слишком мало для того, чтобы из него выделять тестовую выборку. В этом варианте производится заданное число итераций (V), причем всякий раз часть обучающей выборки (равная единице, деленной на заданное целое число) оставляется в стороне, а затем по очереди каждая из отложенных частей используется как тестовая выборка для кросс-проверки построенного дерева классификации. По умолчанию число итераций равно 10.

В настоящее время разработано уже довольно много алгоритмов decision trees. Для решения многих гидрометеорологических задач, в том числе классификации и прогнозирования, на наш взгляд, наиболее перспективным является алгоритм CART. Основные характеристики алгоритма CART: бинарное расщепление, критерий расщепления — индекс *Gini*, алгоритмы minimal cost-complexity tree pruning и V-fold cross-validation, принцип «вырастить дерево, а затем сократить», высокая скорость построения, обработка пропущенных значений и робастность, то есть устойчивость к шумам и выбросам данных.

Рассмотрим тестовый пример функцией отклика — категориальной переменной. По данным за 15 ч в Санкт-Петербурге за июнь — август 2013 г. ($N = 92$) была составлена матрица следующих атмосферных параметров: атмосферное давление, температура воздуха, влажность, направление и скорость ветра, общее количество облаков, облачность нижнего, среднего и верхнего ярусов, то есть всего 9 характеристик. С помощью построения дерева решалась классификационная задача: при каких атмосферных условиях идет дождь, а при каких — нет. Из исходной матрицы следует, что из 92-х дней дождь шел 19 раз, что соответствует 21 % случаев и 73 дня (79 % случаев) он отсутствовал.

Построение дерева осуществлялось на основе алгоритма CART. Вначале было построено полное дерево, которое, как и следовало ожидать, имело довольно сложный вид. В связи с этим возникла задача выбора оптимального дерева. В алгоритме CART в соответствии с [12] его автоматический выбор осуществляется следующим образом: берется дерево с минимальной величиной ценой кросс-проверки (*CV-cost*) и к нему прибавляется его стандартная ошибка (*CV std. error*). Эта сумма принимается за пороговую величину $CV_{крит}$. Далее осуществляется перебор в сторону деревьев меньшей сложности и оптимальным считается такое последнее дерево, для которого

его величина *CV-cost* меньше $CV_{крит}$. Таким образом, выполняется требование оптимальности параметра «сложность/цена».

В табл. 1 приводятся оценки кросс-проверки для четырех деревьев. Отметим, что деревья в программе Statistica [12] нумеруются от более сложных к простым. Полное дерево, обозначенное цифрой 1, включает в себя те исходные переменные, которые участвуют в процессе ветвления с целью выявления условий, когда идет дождь, а когда — нет. Дерево 1 имеет 6 терминальных вершин, непосредственно участвующих в ветвлении, и 5 нетерминальных вершин, которые в данном дереве в ветвлении не участвуют. Итого общее число вершин равно 11. Следующее дерево 2 имеет 3 терминальные вершины и 2 нетерминальные. Наконец, последнее дерево 4 имеет только 1 терминальную вершину, то есть представляет собой исходную выборку.

Таблица 1

Оценки кросс-проверки деревьев различной сложности для комплекса атмосферных параметров в Санкт-Петербурге за летний период (июнь – август) 2013 г.

Показатель	Число терминальных вершин (*Terminal Nodes*)	Цена кросс-проверки (*CV cost*)	Стандартная ошибка кросс-проверки (*CV std. error*)	Цена проверки на обучающей выборке (*Resubstitution cost*)	Сложность узла (*Node complexity*)
Дерево 1	6	0,228	0,043	0,032	0,000
Дерево 2	3	0,206	0,042	0,086	0,018
Дерево 3	2	0,184	0,040	0,108	0,021
Дерево 4	1	0,206	0,042	0,206	0,097

Как видно из табл. 1, минимальная оценка *CV cost* отмечается для дерева 3. С учетом стандартной ошибки $CV_{крит} = 0{,}224$. Далее мы должны двигаться в сторону более простых деревьев и искать такое дерево, для которого выполняется условие $CV\text{-}cost < CV_{крит}$. Этому условию в табл. 1 соответствует дерево 4, то есть непосредственно исходная выборка. Однако по представленным в ней параметрам невозможно определить метеорологические условия, при которых идет дождь, а при которых — нет.

Итак, критерий оптимальности в программе Statistica в данном случае оказывается неинформативным, поэтому мы решили использовать другую возможную стратегию выбора размера дерева, состоящую в том, чтобы наращивать его до такого размера, который бы наилучшим образом соответствовал имеющимся в исходной выборке данным.

На рис. 1 приводятся результаты первого ветвления для атмосферных параметров в Санкт-Петербурге за летний период (июнь – август) 2013 г. Нетрудно видеть, что первым параметром, разделяющим условия «идет дождь» и «нет дождя», является не атмосферное давление, как можно было предположить, а влажность воздуха. Если относительная влажность (U) меньше 68,5 %, то дождь отсутствует, если больше — дождь идет. При $U < 68{,}5$ % имеем 75 случаев, из них 69 дней дождя не было, а в течение 6 дней дождь шел. Условие $U > 68{,}5$ % соответствует 17 дням, из которых 13 дней шел дождь, а 4 дня он отсутствовал.

Итак, влажность воздуха дает правильное решение выполнения условия «идет дождь» и «нет дождя» в 89 % случаях (рис. 2), то есть цена неправильной классификации

составляет 11 %. Однако если рассматривать эти условия по отдельности, то ошибки существенно различаются. Так, ошибка «нет дождя», когда он идет, составляет 8 %, в то время как ошибка условия «идет дождь», когда его нет, равна 23,5 %.

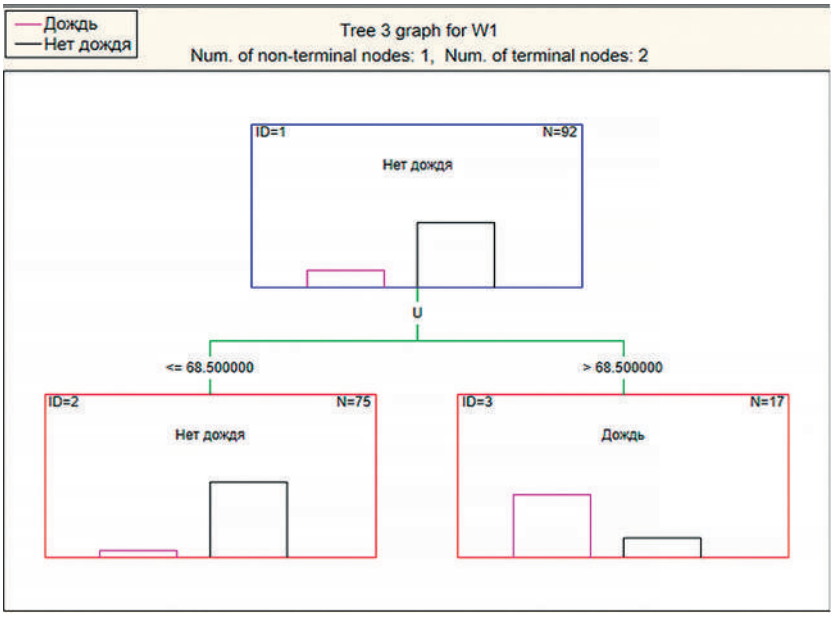


Рис. 1. Дерево решений после первого ветвления для атмосферных параметров в Санкт-Петербурге за летний период (июнь – август) 2013 г. с целью выявления условий, при которых дождь идет или не идет

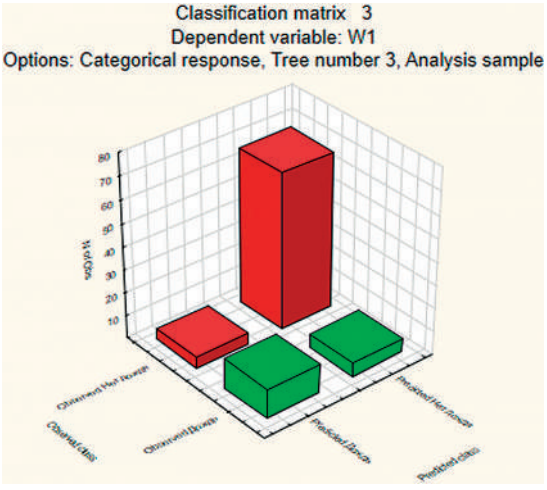


Рис. 2. Результаты разбиения алгоритмом CART атмосферных параметров в Санкт-Петербурге за летний (июнь — август) период 2013 г. при пороговом значении влажности воздуха 68,5 %

Естественно полагать, что при дальнейшем ветвлении качество разбиения может быть улучшено. При этом ввиду малых ошибок левая ветвь дерева вряд ли нуждается в уточнении. Очевидно, имеет смысл рассматривать ветвление только правой части дерева. Разделителем выборки из 17 дней с максимальной вероятностью дождя ($ID = 3$) является атмосферное давление (P). При $P < 756{,}8$ мм рт. ст. выявляется 11 случаев с дождем, причем дней без дождей не было. При $P > 756{,}8$ мм рт. ст. имеем 6 случаев, из которых в действительности дождь шел только 2 раза, а в течение 4 дней он отсутствовал. Итак, имеем полное совпадение с вариантом $U > 68{,}5$ %, когда дождь шел 13 дней, а 4 дня его не было. Следовательно, ветвление дерева с атмосферным давлением уже является лишним. Отсюда следует, что в качестве оптимального дерева можно принять результаты после первого ветвления, то есть дерево 3, содержащее 2 терминальные вершины, в котором единственным разделителем служит влажность воздуха.

Рассмотрим задачу долгосрочного прогноза годового стока р. Сев. Двина — числовой переменной. Отметим, что прогноз стока этой реки очень сложен из-за слабого покрытия речного водосбора гидрометеорологическими данными. Как известно, определяющими факторами межгодовых колебаний стока крупных рек являются: а) запасы влаги в снежном покрове перед началом снеготаяния; б) предшествующее осеннее увлажнение почвы; в) предшествующее летнее увлажнение в апреле — сентябре. При этом, чем больше площадь водосборного бассейна, тем больший вклад этих факторов в колебания стока и тем более длительную предысторию стокоформирующих факторов следует учитывать. Это означает, что сток в i-й год зависит не только от увлажнения в $i-1$ год, но и частично в $i-2$ год.

Итак, основная рабочая гипотеза может быть сформулирована следующим образом. Накопление влаги (общее увлажнение) в бассейне за два предшествующих началу половодья года практически полностью определяет речной сток в его замыкающем створе до начала следующего половодья. Естественно, главное влияние на сток оказывает первый предшествующий год. Влияние второго года сказывается главным образом в аномальные по характеру увлажнения годы. Учтем также, что межгодовая изменчивость осадков значительно превышает аналогичную изменчивость суммарного испарения. Это означает, что испарением можно пренебречь без существенной потери точности в расчетах. В результате прогностическая модель стока в i-й год может быть записана в следующем виде:

$$Q_i = f\left\{\sum^{k1} P_{i-1}, \sum^{k2} (P)_{i-1}, \sum^{k1} P_{i-2}, \sum^{k2} (P)_{i-2}\right\}, \qquad (2)$$

где k_1, k_2 — количество месяцев в холодный (октябрь–март) и теплый (апрель–сентябрь) периоды года соответственно. Но поскольку в гидрологических архивах сток рек обычно дается для календарных годовых периодов, то перейдем в формуле (2) к годовому стоку, а в качестве последнего ($i-1$) периода увлажнения примем теплое полугодие. В этом случае минимальная заблаговременность прогноза стока в формуле (2) будет составлять 15 месяцев.

Годовой сток Северной Двины брался за период 1982–2012 гг. Осадки за указанный период времени доступны только для 8 станций водосбора реки (http://aisori.meteo.

ru/ClimateR). В соответствии с формулой (2) был сформирован архив из 32 временных рядов предикторов. При этом архив был разделен на 2 части: зависимую выборку (1982–2008), которая использовалась для построения прогностической модели, и независимую выборку (2009–2012), по которой выполнялось сравнение фактических и вычисленных по модели значений годового стока.

Вначале для прогноза стока применялся физико-статистический метод, основой которого является модель множественной линейной регрессии (МЛР). С помощью пошагового алгоритма МЛР [2] получена оптимальная модель со следующими статистическими параметрами: число переменных — 6, коэффициент детерминации — 0,74, критерий Фишера — 8,9, стандартная ошибка — 236 м³/с. В принципе, для зависимой выборки результаты неплохие. Однако по независимой выборке стандартная ошибка прогноза составила 427 м³/с, что даже превышает стандартное отклонение величины годового стока (402 м³/с). Это означает, что при таком слабом покрытии территории бассейна осадкомерными станциями данная регрессионная модель не позволяет прогнозировать годовой сток Северной Двины, и необходим поиск альтернативных способов прогноза.

Поэтому мы обратились к методу деревьев решений. Моделирование стока реки Северная Двина выполнялось алгоритмом CART с априорными вероятностями, пропорциональными численности классов и ценой ошибки классификации одинаковой для всех классов. Ограничение на число ветвлений устанавливалось по отклонению с V-кратной кросс-проверкой ($V = 10$), что обеспечивает отсечение дерева по минимальной цене-сложности. Исходными данными послужила выборка из 32 временных рядов предикторов.

На рис. 3 представлено распределение значений цены проверки на обучающей (зависимой) выборке (*Resubstitution cost*) и цены ошибки кросс-проверки (*CV cost*) в зависимости от номера дерева. Дерево 1 имеет 8 терминальных вершин, а последнее дерево 8 — только 1 вершину. Из рис. 3 следует, что с увеличением числа вершин ошибки обучения быстро уменьшаются. Так, уже после второго ветвления (дерево 6, 3 вершины) она уменьшилась почти в 3 раза, а после пятого ветвления (дерево 3, 6 вершин) — в 5 раз. Более сложным оказывается распределение ошибок кросс-проверки. Однако принципиально важным является тот факт, что минимальное значение *CV-cost* соответствует дереву 8 с одной вершиной. Это означает, что данное дерево решений следует считать оптимальным, однако оно практически не позволяет осуществлять прогноз стока. Как и в предыдущем случае, критерий оптимальности не срабатывает.

Для определения дерева оптимального размера мы использовали ту же стратегию, что и в предыдущем тестовом примере. Вначале рассматривали результаты прогноза стока Двины после первого ветвления, затем после второго и так далее, вплоть до последнего дерева. На первом ветвлении разделителем выступают летние осадки за предшествующий $i-1$ год в пункте Онега: если осадков выпало мало (< 341,2 мм), то прогнозируемый, средний для этих случаев, сток реки (3495 м³/с) выше нормы (3317 м³/с); если осадков выпало больше 341,2 мм, то ожидается годовой сток меньше нормы (2981 м³/с) (рис. 4). В первом случае имеем 17 значений стока, во втором — 9. На рис. 4 «Mu» означает среднее значение, а «Var» — дисперсию прогнозируемого ряда годового стока.

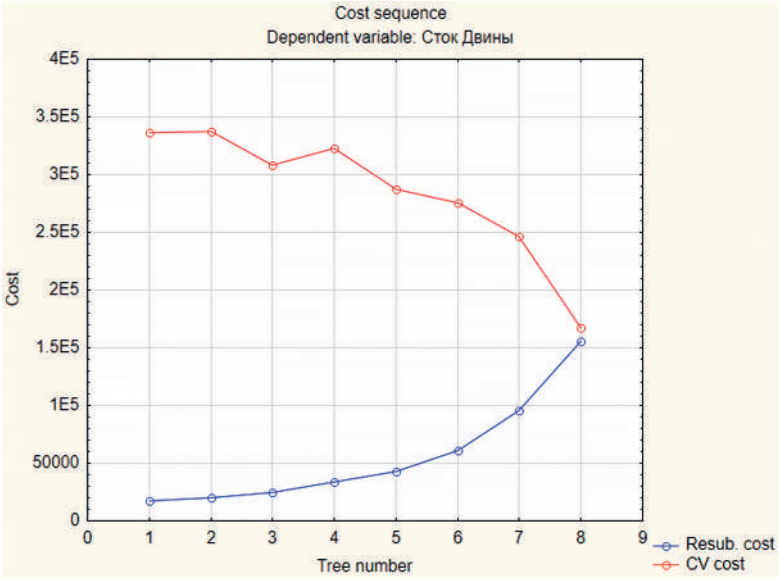


Рис. 3. Распределение значений цены проверки на обучающей (зависимой) выборке (*Resubstitution cost*) и цены ошибки кросс-проверки (*CV cost*) в зависимости от количества узлов дерева при выявлении связи годового стока Северной Двины с осадками на водосборе за два предшествующих года

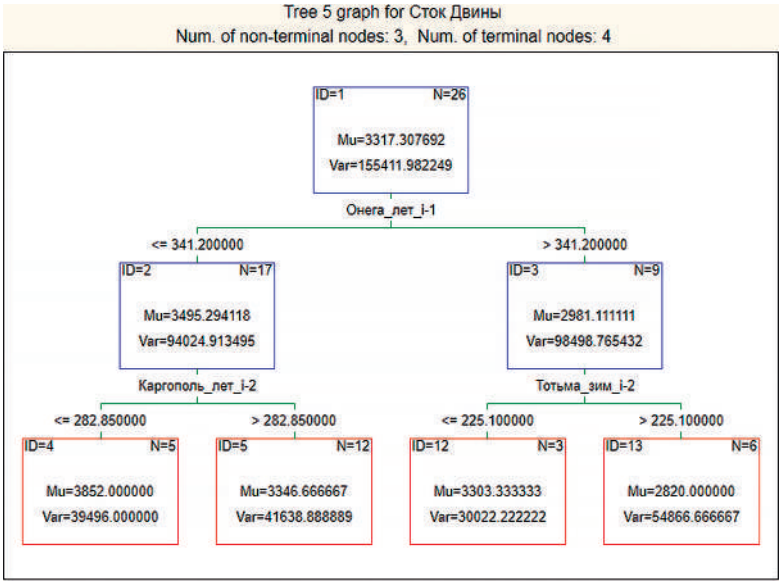


Рис. 4. Дерево решений 5, описывающее формирование годового стока Северной Двины в *i*-й год в зависимости от зимних и летних осадков в $i-1$ и $i-2$ годы на 8 метеорологических станциях, расположенных на территории бассейна

На втором ветвлении происходит уточнение формирования 17 значений повышенного стока Сев. Двины за счет летних осадков в пункте Каргополь за $i-2$ год: если осадков выпадает много (> 282,8 мм), то прогнозируется 12 значений годового стока (3347 м³/с) близкого к норме, если осадков было меньше 282,8 мм, то ожидается 5 значений стока (3852 м³/с), значительно превышающего норму. Выявление фактора формирования оставшихся 9 значений стока реки происходит лишь на 6 ветвлении. Разделителем выступают зимние осадки в пункте Тотьма за $i-2$ год. Если осадков было мало (< 225,1 мм) — прогнозируется умеренное состояние стока со средним значением 3303,3 м³/с, если больше — значительно меньший сток (среднее значение 2820,0 м³/с). Для последующих деревьев разделителями выступают зимние осадки в Шенкурске и в Койнасе за $i-2$ год, в Койнасе за $i-1$ год и летние осадки в Койнасе за $i-1$ год. Другие переменные из исходной выборки не дают какого-либо вклада в описание дисперсии годового стока Северной Двины.

После этого были выполнены расчеты коэффициента детерминации и стандартной ошибки годового стока между исходными и вычисленными значениями стока для зависимой выборки для всех деревьев от 1 до 7 (табл. 2). Нетрудно видеть, что с ростом числа ветвлений коэффициент детерминации увеличивается, а стандартная ошибка годового стока уменьшается. Для полного дерева коэффициент детерминации между исходными и вычисленными значениями стока для зависимой выборки составляет $R^2 = 0{,}89$, стандартная ошибка стока равна 130 м³/с при стандартном отклонении речного стока 402 м³/с. В то же время распределение стандартной ошибки прогностических значений стока для независимой выборки имеет случайный характер, причем ее оценки довольно сильно варьируют. Как видно из табл. 2, стандартная ошибка для полного дерева имеет минимальную оценку для зависимой выборки и максимальную — для независимой выборки. Результат в определенной степени парадоксальный.

Таблица 2

Статистические оценки годового стока Северной Двины по зависимой и независимой выборкам для всех деревьев решений

Статистическая характеристика	Номер дерева						
	1	2	3	4	5	6	7
Коэффициент детерминации по зависимой выборке	0,89	0,87	0,84	0,78	0,72	0,61	0,39
Стандартная ошибка годового стока Северной Двины по зависимой выборке, м³/с	130,3	140,4	157,5	184,0	207,2	246,8	309,1
Стандартная ошибка годового стока Северной Двины по независимой выборке, м³/с	336,2	287,7	334,2	269,3	261,0	293,1	327,0

Наилучшие оценки прогноза стока Северной Двины получаются для дерева 5, имеющего 4 терминальные вершины и 3 нетерминальные (см. рис. 4). Стандартная ошибка стока Северной Двины по независимой выборке равна 261 м³/с, что составляет 0,65 от величины стандартного отклонения стока (402 м³/с), обычно принимаемой в качестве порогового значения точности долгосрочного прогноза. Отметим, что все

деревья, приведенные в табл. 2, обладают прогностической ценностью. Эти результаты принципиально отличаются от прогноза стока на основе модели МЛР.

На рис. 5 приводится сопоставление фактических и вычисленных по дереву 5 годовых значений стока Северной Двины для зависимой и независимой выборки, которое подтверждает их высокое сходство.

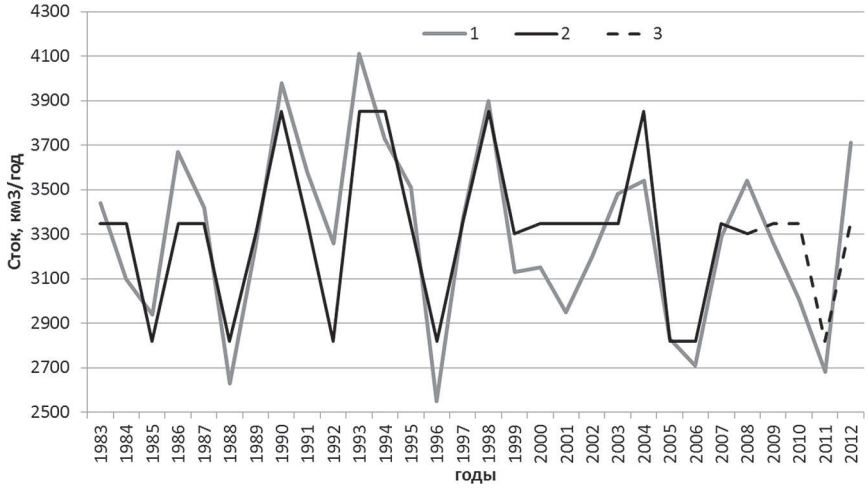


Рис. 5. Сопоставление фактических (*1*) и вычисленных по дереву 5 годовых значений стока Северной Двины (м³/с) для зависимой (1982–2007) (*2*) и независимой (2008–2012) (*3*) выборок

Итак, первые полученные результаты свидетельствуют о широких перспективах использования метода решений деревьев для различных гидрометеорологических задач, включая такую сложную, как долгосрочный прогноз речного стока. Прогноз стока Северной Двины с помощью алгоритма CART обладает высокой точностью, несмотря на то что ветвление происходит формальным путем, и никакой физической основы под ним нет. Очевидно, дальнейшие исследования позволят более четко выявить круг гидрометеорологических задач, для которых может быть использован метод *decision trees*, и решить ряд вопросов методического характера, в частности выбор оптимального размера дерева.

Литература

1. *Андреев И.* Деревья решений — CART: математический аппарат [Электронный ресурс] // Base Group Labs: технологии анализа данных. —URL: Часть 1: https://basegroup.ru/community/articles/math-cart-part1; Часть 2: https://basegroup.ru/community/articles/math-cart-part2.
2. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. — СПб.: РГГМУ, 2008. — 407 с.
3. *Чубукова И.А.* Data Mining. — М.: Интернет-университет информационных технологий; Бином, лаборатория знаний, 2008. — 384 с.
4. *Шампандар А.Е.* Деревья классификации и регрессии // Искусственный интеллект в компьютерных играх. — М.: ИД «Вильямс», 2007. — С. 385–401.

5. *Bramer M.* Principles of Data Mining. — Springer, 2007. — 344 p.– DOI:10.1007/978-1-84628-766-4.
6. *Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C.* Classification and Regression Trees. — Wadsworth, Belmont, CA, 1984. — 358 p.
7. *Classification* and Regression Trees: textbook [Electronic resource]. — Carnegie Mellon University, Statistics Department. — URL: http://www.stat.cmu.edu/~cshalizi/350 /lectures/ 22/lecture-22.pdf
8. *Data* Mining / Википедия-свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Data_mining#cite_note-comp-0
9. *Fayyad U.M., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P., Uthurusamy R.* Advances in knowledge discovery & data mining. — Cambridge, MA: MIT Press, 1996.
10. *Hunt E.B., Marin J., Stone P.J.* Experiments in induction. — N.Y., Academic Press, 1966.
11. *Hand D.J., Mannila H., Smith P.* Principles of Data Mining. — The MIT Press, 2001. — 546 p.
12. *Interactive* Trees (C&RT, CHAID): Statistica Help / StatSoft inc. [Electronic resource]. — URL: http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path= Gxx/Indices/InteractiveTreesCRTCHAID_HIndex
13. *Murthy S.* Automatic construction of decision trees from data: A multidisciplinary survey // Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, vol. 2, iss. 4, p. 345–389. — DOI:10.1023/A:1009744630224.
14. *Popular* Decision Tree: Classification and Regression Trees (C&RT) / DELL Software [Electronic resource]. — URL: http://documents.software.dell.com/Statistics/ Textbook/Classification-and-Regression-Trees
15. *Pregibon D.* Data Mining // Statistical Computing and Graphics, 1997, vol. 7, p. 8.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-05-00837).

В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, Ф.Л. Соловьев, С.Э. Бонгу, А. Джалалванд

О ВОЗМОЖНОСТИ УЧЕТА ИСПАРЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕГО РЕЧНОГО СТОКА (НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОЙ АФРИКИ)

V.V. Kovalenko, E.V. Gaidukova, F.L. Solovyev, S.E. Bongu, A. Jalalvand

THE POSSIBILITY OF ACCOUNTING EVAPORATION AT MODELING OF FORMATION OF RIVER FLOW (ON THE EXAMPLE OF WEST AFRICA)

Рассматривается один из возможных подходов к обеспечению устойчивости статистических моментов вероятностных распределений многолетнего речного стока путем частичного расширения фазового пространства модели его формирования. В его основе лежит переход к условным распределениям, ранее апробированный для физико-географических условий России.

Ключевые слова: кривая обеспеченности, безусловная обеспеченность, многолетнее испарение, условная обеспеченность.

One of the possible approaches to ensure the sustainability of the statistical moments of probability distributions of river flow by expansion of the phase space of the model form is considered. It is based on the transition to conditional distributions, previously approved for the physical and geographical conditions of Russia.

Keywords: the curve of probability, absolute probability, the norm of evaporation, the conditional probability.

Проблемная ситуация и возможный путь ее преодоления

В последние десятилетия в Российском государственном гидрометеорологическом университете получены результаты, указывающие на то, что статистические моменты вероятностных распределений многолетних видов речного стока могут быть неустойчивыми. Имеется в виду неустойчивость решения модели формирования стока в виде системы уравнений для начальных моментов m_n ($n = \overline{1,4}$):

$$\begin{aligned}
dm_1/dt &= -\left(\bar{c} - 0{,}5G_{\tilde{c}}\right)m_1 - 0{,}5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N};\\
dm_2/dt &= -2\left(\bar{c} - G_{\tilde{c}}\right)m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}};\\
dm_3/dt &= -3\left(\bar{c} - 1{,}5G_{\tilde{c}}\right)m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7{,}5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1;\\
dm_4/dt &= -4\left(\bar{c} - 2G_{\tilde{c}}\right)m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2,
\end{aligned} \qquad (1)$$

где $c = 1/(k\tau) = \bar{c} + \tilde{c}$; $\bar{N} = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$ ($\bar{c}$ и $\bar{N}$ — математические ожидания; $\tilde{c}$ и $\tilde{N}$ — белые шумы с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$); k – коэффициент стока; τ – время релаксации бассейна; $\dot{X}$ — осадки.

Из системы (1) видно, что при $\bar{c} < 0{,}5nG_{\tilde{c}}$ производная $dm_n/dt > 0$, то есть $m_n \to \infty$. Это и есть формальный признак неустойчивости. Если обозначить $\beta = G_{\tilde{c}}/\bar{c}$, то неустойчивость для момента n-го порядка m_n возникает при $\beta > 2/n$ (m_3: $\beta > 2/3$, m_2: $\beta > 1$, m_1: $\beta \to 2$). Чем старше момент, тем меньшая относительная интенсивность шума $G_{\tilde{c}}$ требуется для его неустойчивости. Неустойчивость — индикатор того, что бассейны, в которых она имеет место, формируют сток по более сложной схеме, чем это следует из уравнения Пирсона. Например, распределения плотности вероятности двумодальны или имеют «толстый хвост». В последнем случае модель перестает контролировать (статистически предсказывать) появление значительных расходов воды (выбросов). Формально это означает, что при $G_{\tilde{c}} \approx \bar{c}$ мультипликативная составляющая в системе (1) стремится к нулю и при прогнозах для определения прогнозных моментов $m_n^{\text{пр}}$ производится операция деления на 0 (а «на ноль делить нельзя»).

Для преодоления возникшей проблемы в РГГМУ была разработана методология частично инфинитного моделирования, суть которой заключается в следующем. Неустойчивость рассматривается как атрибут процессов развития, а так как развитие системы означает появление (зарождение) у нее новых свойств (фазовых переменных), то включение в модель формирования стока новых переменных (наряду с расходом воды) уменьшает мультипликативный шум за счет частичного перераспределения внешнего воздействия на внутреннюю реакцию бассейна. Вместо одномерного уравнения ФПК применяется n-мерное

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial \left(A_i p\right)}{\partial Y_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{n} \frac{\partial^2 \left(B_{ij} p\right)}{\partial Y_i \partial Y_j}, \tag{2}$$

где p — плотность вероятности; $\vec{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3, \ldots Y_n)$ вектор состояния; A_i, B_{ij} – коэффициенты сноса и диффузии.

Устойчивость моментов в расширенной (за счет включения в уравнение испарения) модели ФПК (2) будет в случае сжимаемости частично инфинитной среды для двумерного распределения:

$$\operatorname{div}\vec{A} = \sum \partial A_i / \partial Q_i = -\left(\bar{c}_Q - 0{,}5G_{\tilde{c}_Q}\right) - \left(\bar{c}_E - 0{,}5G_{\tilde{c}_E}\right) < 0, \tag{3}$$

где $\bar{c}_E$ и $G_{\tilde{c}_E}$ — математическое ожидание и интенсивность шума мультипликативной составляющей модели испарения.

Из выражения (3) следует, что учет дополнительной фазовой переменной в виде испарения увеличивает шансы на сжимаемость, если, конечно, и для нее нет тенденции к неустойчивости ($G_{\tilde{c}_E} \to \bar{c}_E$). Чтобы проверить это утверждение (см. [1, 2, 3]), выражение (3) было приведено к виду (с учетом того, что $\beta = G_{\tilde{c}}/\bar{c}$):

$$\operatorname{div}\vec{A} = -\bar{c}_Q \left(1 - 0{,}5\beta_Q\right) - \bar{c}_E \left(1 - 0{,}5\beta_E\right). \tag{4}$$

Результаты вычисления β_Q и β_E для ЕТР показали, что β_Q уменьшается с юга на север ($\beta_Q = 1{,}93$, р. Кума – ст-ца Александрийская, 44° с.ш.; $\beta_Q = 0{,}25$, р. Пеза – д. Игумново, 66° с.ш.), а β_E — увеличивается (для тех же бассейнов — с 0 до 0,87). Таким образом,

каждая из переменных (Q и E) стабилизирует другую (тем в большей степени, чем неустойчивая последняя), то есть действует компенсационный механизм, обеспечивающий статистическую устойчивость совместных распределений стока и испарения.

Исходная информация и предлагаемая методика упрощенного учета испарения

Для обоснованного усложнения моделей формирования многолетнего стока Западной Африки необходимо проверить как минимум два условия: 1) наличие речных бассейнов с фрактальной размерностью больше 1 (размерность пространства вложения 2); 2) наличие зон неустойчивости по статистическим моментам. Проверка первого условия проводилась методами фрактальной диагностики [4], а второго — с помощью полученной ранее в РГГМУ формулы

$$\beta = 2k \ln r + 2, \tag{5}$$

где k — коэффициент стока (испарения); r — коэффициент автокорреляции стока (испарения) при годовой сдвижке. Результаты проверки этих условий представлены на рис. 1.

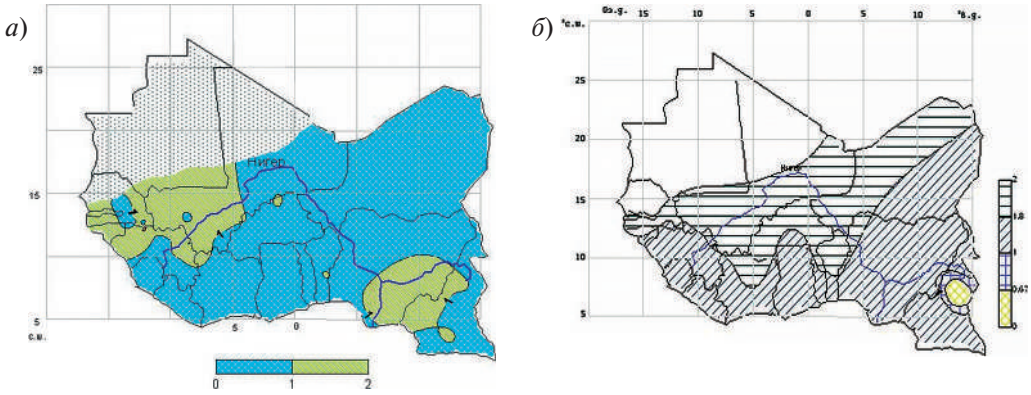


Рис. 1. Размерности пространства вложения рядов годового стока (*а*) и зоны неустойчивости статистических моментов (*б*)

Таким образом, имеются все предпосылки для перехода к двумерному распределению плотности вероятности $p(Q, E)$. Для этого необходимо иметь кроме рядов стока еще ряды испарения. На рис. 2 показаны центры водосборов, по которым выполнялись расчеты (см. табл.). Ряды испарения генерировались по формуле Тюрка [5]:

$$E = P \Big/ \sqrt{0{,}9 + \frac{P^2}{\left(300 + 25T + 0{,}05T^3\right)^2}}, \tag{6}$$

где E — суммарное годовое испарение, мм/год; P — годовое количество осадков, мм/год; T — среднегодовая температура воздуха, °С.

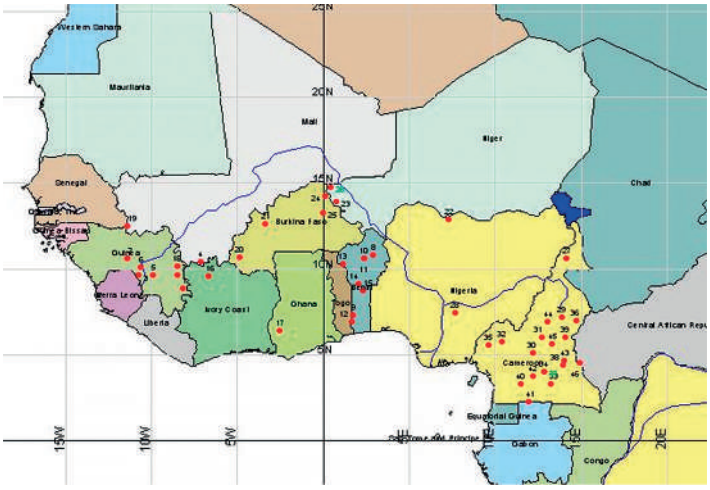


Рис. 2. Распределение исследуемых водосборов по территории Западной Африки

Ряды стока и испарения (1951–1990) подверглись стандартной процедуре статистической обработки (исследование на однородность, наличие маловодного и многоводного периодов, определение расчетных статистических характеристик). По имеющимся совместным рядам слоя стока и испарения строились эмпирические двумерные гистограммы (примеры см. рис. 3).

Наличие эмпирических двумерных гистограмм создает возможности для разработки различных двумерных вариантов уравнения (2) и способов их решения. В частности, для случайных установившихся процессов предложен двумерный аналог модели Пирсона для $p(Q, E)$ [1]. Она представляет собой уравнение в частных производных первого порядка, а его решением методом характеристик служит двумерная поверхность в трехмерном пространстве $p(Q, E)$ [6].

В инженерной гидрологии широко применяется понятие кривой обеспеченности $p(Q)$. В одномерном случае распределение $p(Q)$ легко преобразуется в кривую $p(Q)$, понятие же «двумерная обеспеченность» не применяется. Поэтому, на первый взгляд, многомерные распределения имеют широкую область применения в теоретической гидрологии, но в проектной практике их использование для задания расходов требуемой обеспеченности затруднительно (по крайней мере, такого опыта у проектировщиков нет). Ниже описан возможный полиатив по использованию распределений $p(Q, E)$ для получения одномерных кривых обеспеченности с более устойчивыми статистическими моментами.

Идея заключается в переходе от безусловных распределений $p(Q)$ [или $p(Q)$] к условным, в которых условием служит информация об испарении, получаемая из двумерных распределений $p(Q, E)$. На эллипсах рассеивания (рис. 4) выбирается диапазон ΔE, включающий в себя значение нормы испарения $\bar{E}$, и отсекается от остального поля точек. (При пяти столбцах гистограммы по оси испарения отсекаются крайние.) По точкам, попавшим в диапазон ΔE, строятся условные кривые обеспеченности $p(Q/\Delta E)$. В результате этой процедуры происходят как негативные, так и позитивные последствия.

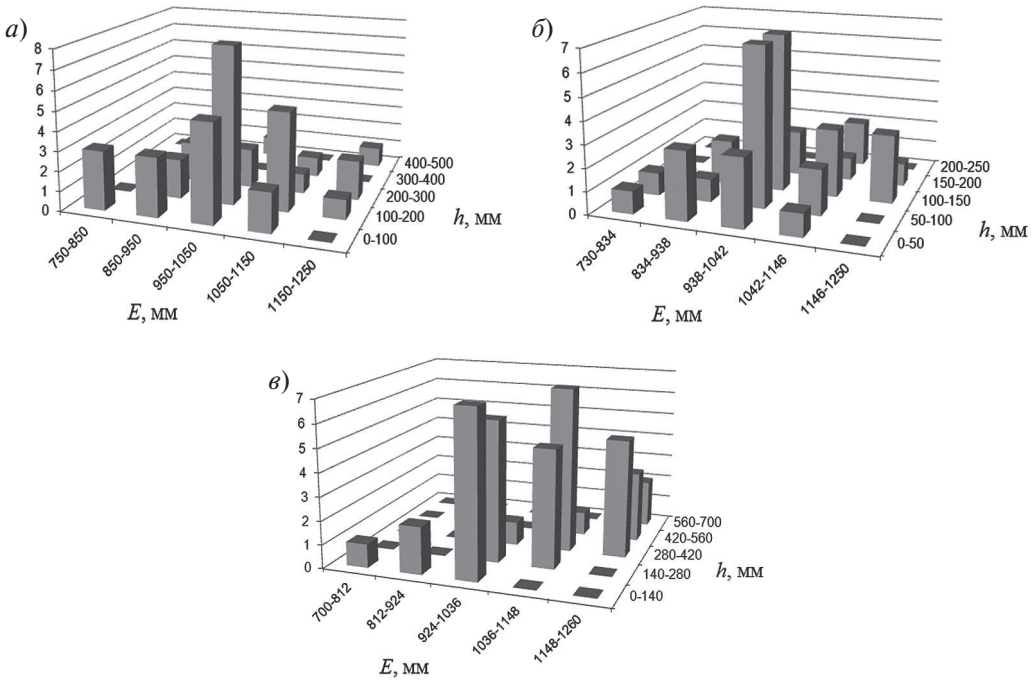


Рис. 3. Двумерные гистограммы годовых значений испарения и речного стока:
а — р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Amont; *б* — р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval;
в — р. Faleme – ст. Gourbassy

1. Происходит усечение ряда расходов воды за счет маловероятных значений расхода и испарения. Конечно погрешность определения нормы, коэффициентов вариации *Cv* и асимметрии *Cs* при этом увеличивается. Например, при $Cv = 0{,}3$ и уменьшении объема выборки в два раза погрешность определения *Cv* увеличивается с 9,53 до 13,5 %, то есть на 30 %.
2. Однако применение условных распределений открывает возможность корректного прогнозирования в зонах с неустойчивым формированием стока. Природу этой корректности можно пояснить на примере уравнения для первого момента из системы (1). Для равновесного климатического сценария можно принять, что $dm_1^{\text{пр}}/dt = 0$. Тогда

$$m_1^{\text{пр}} = \frac{-0{,}5G_{\bar{c}\tilde{N}} + \bar{N}}{\bar{c} - 0{,}5G_{\tilde{c}}}. \qquad (7)$$

Если $\beta = G_{\tilde{c}}/\bar{c} \to 2$, то надо делить на величину, близкую к нулю. Если мы находимся в неустойчивых южных регионах ЕТР, где $k = 0{,}05$, то $\bar{c} = 20$, а $G_{\tilde{c}}$ близка к 40. Даже если β далек от двух, то все равно из-за неизбежных погрешностей при параметризации мы имеем малую разность двух неточных величин. Это делает расчеты очень неточными (для старших моментов ситуация только усугубляется).

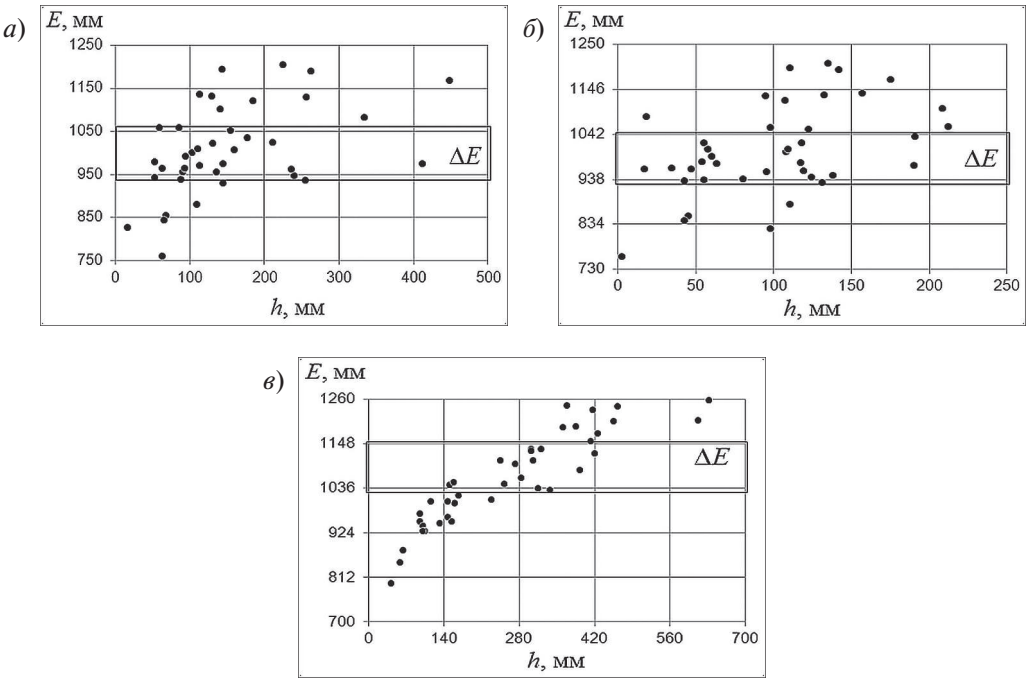


Рис. 4. Эллипсы рассеивания: *а* — р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Amont; *б* — р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval; *в* — р. Faleme – ст. Gourbassy

Таким образом, эффект от применения условных распределений (по сравнению с неустойчивыми безусловными) достигается за счет того, что мы, отбрасывая члены рядов с большими испарениями, уменьшаем интенсивность мультипликативного шума $G_{\bar{c}}$, оставляя неизменным параметр $\bar{c}$, то есть увеличиваем разность $(\bar{c} - 0{,}5G_{\bar{c}})$. (По существу, таким же путем, правда неявно, идет и классическая гидрология, вообще выбрасывая из рассмотрения четвертый момент m_4, связанный с эксцессом и интенсивностью $G_{\bar{c}}$, а значит, и с «поднятием хвоста» распределения $P(Q)$. Так как она не имеет дело с генетическими моделями (1), то проблемы неустойчивости в рассматриваемом нами смысле для нее вообще не существует. Еще следует заметить, что если в модели (1) в качестве внешнего воздействия возьмем не просто $\bar{N} \sim \dot{X}$, а $\bar{N} \sim \dot{X} - E$, то $\bar{c} \to 1$, и «шуметь» практически «нечему», так как $G_{\bar{c}} \to 0$, $\beta \to 0$ [7].)

На рис. 5 приведен пример, показывающий, что проэкстраполированный в зону малых обеспеченностей «хвост» условного распределения быстрее приближается к оси стока, чем безусловный. Объективную картину скорости этого приближения дает таблица результатов вычисления слоя стока 0,1-, 1- и 10-процентной обеспеченности по безусловным и условным распределениям (в таблице: откл. = (безусл. − усл.)/усл.). Отклонения встречаются и минусовые, но в целом (среднем арифметическом) условные распределения имеют меньшие значения, причем тем меньше, чем меньше обеспеченность.

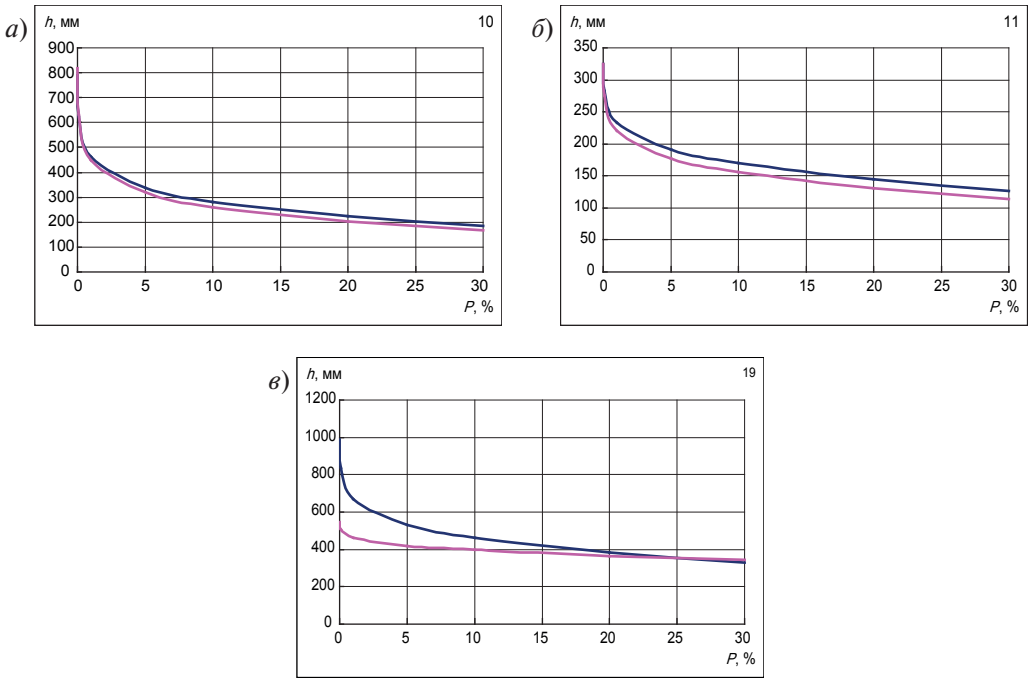


Рис. 5. Безусловные и условные кривые обеспеченностей:
а — р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Amont; *б* — р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval;
в — р. Faleme – ст. Gourbassy

Сопоставление безусловных и условных обеспеченных значений стока

№ поста	Река	Станция	Обеспеченность, %								
			0,1			1			10		
			безусл.	усл.	откл., %	безусл.	усл.	откл., %	безусл.	усл.	откл., %
1	Tinkisso	Dabola	1401	1213	13	1052	940	11	668	627	6
3	Niger	Faranah	1735	1984	−14	1512	1660	−10	1225	1288	−5
4	Milo	Kankan	1090	923	15	978	848	13	821	738	10
5	Niandan	Baro	1164	1200	−3	1016	1052	−4	812	844	−4
6	Niger	Kouroussa	1340	1092	18	1040	895	14	707	657	7
7	Sankarani	Mandiana	1003	837	17	802	702	12	581	544	6
8	Irane	Koutakoukrou	543	732	−35	398	480	−21	238	230	3
9	Couffo	Lanhounta	680	374	45	444	274	38	210	164	22
10	Alibori	Route Kandi-Banikoara Amont	627	634	−1	461	449	3	282	260	8
11	Alibori	Route Kandi-Banikoara Aval	282	275	3	233	221	5	170	156	8
12	Mono	Athieme	764	462	40	601	383	36	395	283	28

Окончание табл.

№ поста	Река	Станция	Обеспеченность, %								
			0,1			1			10		
			безусл.	усл.	откл., %	безусл.	усл.	откл., %	безусл.	усл.	откл., %
14	Oueme	Pont De Save	548	297	46	423	253	40	277	195	30
15	Oueme	Bonou	666	128	81	462	128	72	253	128	49
16	Bagoe	Tombougou 1	1709	1069	37	1267	898	29	819	702	14
18	Sankarani	Gouala	1164	992	15	865	744	14	538	469	13
19	Faleme	Gourbassy	837	507	39	667	463	31	463	397	14
20	Comoe	Diarabakoko	446	429	4	352	328	7	241	214	11
21	Black Volta	Boromo	73	56	24	62	50	19	47	42	10
22	Maradi	Madarounfa	148	184	−24	110	131	−20	68	76	−12
23	Dargol	Kakassi	73	63	14	60	51	14	43	36	16
24	Garouol	Dolbel	148	165	−12	110	118	−8	69	70	−1
25	Sirba	Garbe-Kourou	57	43	24	48	34	29	36	24	34
26	Garouol	Alcongui	34	43	−27	23	29	−30	12	15	−34
27	Tsanaga	Bogo	1022	386	62	672	316	53	324	236	27
28	Bini	Berem	685	653	5	652	635	3	601	597	1
29	Vina	Lahore	897	859	4	878	852	3	825	817	1
30	Ndjeke	Ngongon	517	560	−8	497	513	−3	453	445	2
31	Mape	Magba	1057	1022	3	998	962	4	906	873	4
32	Noun	Bafoussam	941	847	10	901	835	7	827	794	4
33	Dja	Somalomo	709	597	16	616	529	14	502	445	11
34	Nyong	Ayos	460	484	−5	447	469	−5	413	430	−4
36	Mbere	Mbere	897	1058	−18	763	869	−14	607	659	−8
37	Nyong	Akonolinga	454	468	−3	443	456	−3	413	423	−2
38	Kadei	Batouri	605	564	7	552	514	7	487	456	6
39	Lom	Betare-Oya	783	881	−13	695	759	−9	595	624	−5
40	Nyong	Kaya	561	564	0	540	542	0	495	492	1
41	Ntem	Ngoazik	814	860	−6	722	769	−7	603	643	−7
42	Nyong	Olama	848	950	−12	750	775	−3	611	578	5
43	Kadei	Pana	549	549	0	496	489	1	430	418	3
44	Djerem	Mbakaou	961	1022	−6	878	933	−6	763	809	−6
45	Mbam	Goura	712	720	−1	692	694	0	644	636	1
46	Logone	Moundou	670	780	−16	632	690	−9	554	566	−2
Среднее откл., %			17			14			10		

Выводы

Таким образом, в Западной Африке, как и на юге ЕТР, отмечается неустойчивость статистических моментов и огромные территории с фрактальной размерностью больше единицы. Поведение условных и безусловных распределений также идентично: чем

меньше обеспеченность, тем больше расходы у безусловных кривых по сравнению с условными. К этому следует добавить, что испарение в Западной Африке формируется более устойчиво, чем сток (аналогичная картина складывается в целом для регионов с теплым климатом, например в Иране). Методика перехода к условным распределениям $p(Q/\Delta E)$ от двумерных $p(Q, E)$ применима и для других регионов, в частности в Южной Африке и Иране, так как формирование стока повсеместно происходит в режиме марковских случайных процессов.

Литература

1. *Коваленко В.В.* Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии. — СПб.: РГГМУ, 2011. — 107 с.
2. *Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Соловьев Ф.Л., Чистяков Д.В.* Частично инфинитное расширение фазового пространства модели формирования многолетнего речного стока для статистически устойчивого прогнозирования катастроф // Естеств. и технич. науки. 2009. № 2. — С. 193–199.
3. *Соловьев Ф.Л.* Повышение устойчивости вероятностных распределений многолетнего годового стока при прогнозировании долгосрочных его изменений (на примере Европейской территории России): Автореф. дис. ... канд. тех. наук, спец. 25.00.27. — СПб.: РГГМУ, 2009. — 131 с.
4. *Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Арман К.Б.Г.* Прогнозирование изменений фрактальной размерности многолетнего речного стока // География и природные ресурсы. 2008. № 4. — С. 136–143.
5. *Гайдукова Е.В., Диавара Х., Бонгу Э.С.* Критический анализ методов расчета суммарного испарения для речных бассейнов Африки // Теория и практика современной науки: XVI Междунар. научно-практ. конф. / Науч.-инф. издат. центр «Институт стратегических исследований». — М.: Изд-во «Ин-т стратег. иссл.», 2014. — С. 531–537.
6. *Коваленко В.В.* Метаморфоз понятий частично инфинитной гидрологии в контексте деструкции онтологии М. Хайдеггером. — СПб.: РГГМУ, 2015. — 132 с.
7. *Коваленко В.В.* О влиянии коэффициента эксцесса на зависимость фрактальной размерности рядов многолетнего стока от климатической нормы приземной температуры воздуха // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 32. — С. 17–24.

Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № госрегистрации 01 20014 58678).

Д.В. Соколова, Е.Г. Алексеева, К.В. Шеманаев

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА МАЛОИЗУЧЕННЫХ И НЕИЗУЧЕННЫХ ВОДОСБОРАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

D.V. Sokolova, E.G. Alekseeva, K.V. Shemanaev

FEATURES OF TECHNOLOGY OF AUTOMATED FORECASTING HAZARDOUS HYDROLOGICAL EVENTS IN UNGAUGED AND POORLY GAUGED BASINS OF THE RUSSIAN FEDERATION

Рассмотрены особенности технологии автоматизированного прогнозирования опасных гидрологических явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации.

Ключевые слова: гидрологическая модель MLCM2, гидрологические прогнозы, малоизученные и неизученные водосборы, прогнозирование.

Features of technology of the automated forecasting of hazardous hydrological phenomena in ungauged and poorly gauged basins of the Russian Federation is considered.

Keywords: hydrological model MLCM2, hydrological forecasts, poorly gauged and ungauged basins, forecasting.

Введение

Опасные гидрологические процессы и явления могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций природного характера, способных нанести вред здоровью людей или окружающей природной среде, вызвать значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей. Опасными являются гидрометеорологические процессы и явления, определяющие формирование речного стока, включая опасные и катастрофические дождевые паводки и сезонные половодья.

В условиях изменения климата и возрастающей антропогенной нагрузки на речные водосборы статистические методы прогнозирования теряют свою эффективность, и единственным методом качественного прогнозирования наводнений становится математическое моделирование, эффективность которого во многом зависит от калибровки (параметризации) используемых гидрологических моделей [1].

Опасные гидрологические процессы в развитых (в гидрометеорологическом отношении) странах обычно прогнозируются в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Типовая прогностическая процедура, как правило, включает следующие элементы:

- автоматическое получение данных наземных, радарных и спутниковых наблюдений, а также выходных данных численных моделей погоды;
- автоматическую обработку данных, их усвоение и архивирование;

– предварительную калибровку и валидацию прогностической модели;
– запуск модели — выпуск и автоматическую рассылку прогнозов, а при необходимости — формирование и распространение оповещений о повышении гидрологического или метеорологического риска [7].

Технология автоматизированного прогнозирования опасных гидрологических процессов и явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации

Подобной структурой обладает технология, разработанная в РГГМУ в рамках НИР «Водосбор» (тема «Автоматизированное прогнозирование опасных гидрологических процессов и явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации»), однако ее контент полностью адаптирован к условиям РФ.

Главной целью технологии автоматизированного прогнозирования опасных гидрологических явлений малоизученных и неизученных водосборах является создание комплекса расчетных и технологических процедур, которые могут быть использованы в полностью автоматизированном режиме вне зависимости от степени гидрометеорологической изученности водосбора. Ключевые принципы технологии:

– прогнозирование выполняется по двухуровневому принципу: сначала осуществляется автоматическое фоновое прогнозирование стока для сравнительно крупных территорий, целью которого является выявление водосборов с повышенным уровнем риска формирования опасного гидрологического процесса или явления, а затем — уточненное прогнозирование стока. Этот подход позволяет эффективно использовать имеющиеся вычислительные, информационные и кадровые ресурсы;
– массивы исходных данных для гидрологической модели формируются путем интегрирования разнородных данных [2];
– получение данных, контроль и анализ их качества, обработка, ассимиляция и архивирование выполняются в полностью автоматизированном режиме, что позволяет эффективно использовать имеющиеся вычислительные, информационные и кадровые ресурсы;
– в качестве гидрологической модели используется усовершенствованная версия разработанной в РГГМУ модели Multi-Layer Conceptual Model 2 (MLCM2), которая может быть использована как для интерактивного, так и для полностью автоматизированного прогнозирования стока (было экспериментально установлено, что эта модель обладает большей прогностической эффективностью, чем американская модель «Сакраменто»);
– калибровка и валидация модели MLCM2 выполняются в полностью автоматизированном режиме.

Основными элементами данной технологии являются:

1. Блок получения и первичной обработки данных (с программным обеспечением, предназначенным для анализа и контроля качества поступающих данных и их первичной обработки).

2. База данных (с программным обеспечением, предназначенным для архивирования данных в оригинальном и исправленном виде, а также документирования и протоколирования всех выполняемых процедур). Для этой цели использована база данных аппаратно-программного комплекса «INWADA», разработанная в рамках АВЦП Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2013 гг.)», № 2.1.1/9901 «Автоматизированная система краткосрочного прогнозирования паводков и половодий».
3. Блок расчетов и прогнозирования (включает процедуры количественного и качественного оценивания степени гидрологической изученности речного водосбора, модель для фонового и уточненного прогнозирования дождевых паводков и сезонных половодий на неизученных и малоизученных водосборах, а также инструментарий для калибровки и валидации модели).

Блок получения и первичной обработки данных ориентирован на полностью автоматизированное использование следующих видов данных.

Спутниковые данные, использование которых позволяет заметно повысить эффективность прогнозирования паводков на малоизученных и неизученных водосборах. Наибольший интерес с точки зрения прогнозирования паводков представляют данные о влажности верхнего слоя почвы (до 2–5 см от поверхности), позволяющие корректировать начальные условия при моделировании стока.

Радарные данные позволяют значительно повысить пространственно-временную дискретность наблюдений за осадками и сделать ее достаточной для моделирования и прогнозирования катастрофических дождевых паводков при помощи концептуальных гидрологических моделей с распределенными параметрами. Для этой цели в РГГМУ был установлен современный доплеровский метеорадар METEOR DX50, позволяющий получать необходимые данные с шагом в несколько минут и избыточной (с точки зрения гидрологического прогнозирования) дискретностью.

Выходные данные мезомасштабных моделей погоды являются важнейшим элементом фонового прогнозирования стока. В частности, их использование позволяет повысить заблаговременность фоновых прогнозов стока на 3–5 суток. В РГГМУ для этой цели используется модель WRF (Weather Research and Forecasting Model).

Обработка поступающих данных включает идентификацию пропусков и недопустимых символов, заполнение пропусков в соответствии с рекомендациями ВМО, ассимиляцию данных и формирование единых массивов данных об осадках и испарении. Выполняется автоматическое архивирование данных об осадках и стоке, находящихся в открытом доступе на веб-сайтах зарубежных гидрометслужб, что позволяет выполнять исследования в области моделирования стока (включая паводки) в режиме, близком к реальному времени (с задержкой не более трех часов).

Основным инструментом поиска, передачи и архивирования данных является программа-краулер (от англ. *crawler* — ползающая форма, гусеница), которая отыскивает и архивирует необходимую информацию в заданном режиме. После этого первичные данные, имеющие различную пространственно-временную дискретность, размерность, а иногда опечатки и пропуски, проходят процедуры анализа и контроля качества (QA/QC), редактирования, ремасштабирования и усвоения. В результате

получаются регулярные откорректированные массивы данных с требуемой пространственно-временной дискретностью, которая зависит от специфики и целей прогнозирования [4].

Наличие динамической базы данных (БД) является обязательным условием действенного функционирования систем автоматизированного прогнозирования как «обычного» стока, так и опасных гидрологических процессов и явлений. Именно сюда поступают данные из различных источников, здесь они обрабатываются и архивируются и отсюда считываются прогностической моделью.

Метод прогнозирования дождевых паводков на неизученных и малоизученных (в метеорологическом и гидрологическом отношении) водосборах, предлагаемый нами, основан на использовании гидрологической модели MLCM2, испытания которой продолжаются в РГГМУ, «входом» которой служат данные, получаемые из различных источников (спутников, радаров, численных моделей погоды).

Концептуальная гидрологическая модель MLCM2

Гидрологическая модель MLCM2 (от англ. *Multi-Layer Conceptual Model, version 2* — многослойная концептуальная модель, вторая версия) является моделью типа «осадки – сток» с гибкой структурой и высоким уровнем концептуализации. С технической точки зрения при выполнении калибровки (параметризации) модели ее можно легко свести как к сравнительно простым моделям водосбора или руслового стока, так и к более сложным гидрогеологическим моделям, учитывающим гидравлические свойства почвогрунтов рассматриваемого водосбора.

Процедура моделирования стока состоит из двух основных функциональных элементов:

1) Формирование «входа» гидрологической модели MLCM2 может быть сделано как в ручном, так и в автоматическом режиме, путем использования данных наземных наблюдений или же посредством интегрирования данных дистанционного зондирования и «выхода» численных моделей погоды. В последнем случае (при прогнозировании стока с малоизученных в метеорологическом отношении водосборов) эти данные проходят процедуру усвоения с использованием сравнительно разрозненных наземных наблюдений.
   Автоматическое формирование «входа» гидрологической модели MLCM2 выполняется при помощи специального программного обеспечения. Обязательными являются оперативные данные о сумме осадков с дискретностью 1 ч, 6 ч, 12 ч или 1 сутки. При отсутствии таковых цели фонового прогнозирования стока могут быть вполне удовлетворительно достигнуты путем использования в качестве входных данных модели MLCM2 «выходных» данных мезомасштабной синоптической модели WRF. Кроме того, нужны данные о полном испарении [2].
2) Настройка и непосредственное использование модели MLCM2: автоматическая калибровка гидрологической модели MLCM2 выполняется при помощи специально разработанного для этой цели оптимизационного алгоритма, который будет рассмотрен ниже. При необходимости крупные и средние водосборы разбиваются на более мелкие частные водосборы, однако индивидуальная калибровка

модели для таких водосборов не выполняется. Тем не менее процедура разбиения исходного водосбора на более мелкие все равно имеет смысл, если для каждого из них могут быть заданы «входные» осадки и имеется схема стекания воды по русловой сети к замыкающему створу. Для калибровки гидрологической модели MLCM2 необходимы синхронные массивы данных об осадках, стоке и полном испарении (по возможности, за разнообразные по водности годы). После калибровки выполняется валидация найденных параметров. Важно подчеркнуть, что для калибровки и валидации целесообразно использовать различные виды целевой функции.

«MLCM2.v2» является программным обеспечением, обладающим такими ключевыми опциями оперативной гидрологической модели, как оптимизация параметров (калибровка) и валидация. ПО «MLCM2.v2» по своим характеристикам соответствует требованиям ВМО [5].

Для решения проблемы параметризации моделей в ПО используется способ квазилокальной оптимизации в физически предопределенном районе области определения целевой функции — SLS (от англ. *Stepwise Line Search* — пошаговый линейный поиск, являющийся разновидностью шаблонной оптимизации). Базовый алгоритм имеет несколько модификаций, разработанных для калибровки прогностических моделей, применяемых для прогнозирования стока в различных условиях. Метод SLS является наиболее подходящим в случаях, если априорная (начальная) точка при квазилокальной оптимизации задана корректно, а водосбор достаточно хорошо освещен гидрометеорологическими наблюдениями [3].

Кроме того, в распоряжении пользователя имеется оптимизационный метод Нелдера–Мида (или симплекс-метод), который основывается на использовании техники нелинейной оптимизации (это вычислительный метод, применяемый для дважды дифференцированных и унимодальных задач). Метод использует понятие симплекса, то есть выпуклого многогранника с $N+1$ вершиной в N-мерном пространстве. Данный метод определяет поведение функции в нескольких тестовых точках. Затем одна тестовая точка заменяется на новую, и процесс повторяется. Простейший шаг заключается в замене наименее походящей точке другой, которая отражена через центр масс остальных N точек. Если она подходит больше, то мы пробуем экстраполировать значения экспоненциально вдоль линии. Если же новая точка ненамного лучше предыдущей, мы движемся пошагово в окрестности минимума, таким образом уменьшая симплекс до лучшей точки. Суть метода заключается в последовательном перемещении и деформировании симплекса вокруг точки экстремума [7].

В предлагаемом ПО можно произвести полную настройку параметров модели (рис. 1, 2). Пользователь может выбрать один из четырех методов калибровки: метод SLS, случайный перебор, осуществляемый при помощи встроенного генератора случайных чисел, метод Нелдера – Мида и расширенный метод Нелдера – Мида [6].

Также у пользователя есть возможность выбрать вид целевой функции для калибровки и валидации. В настоящее время пользователь может выбрать один из трех вариантов: среднеквадратическая ошибка, критерий S/σ и мультимасштабная целевая функция MSOF.

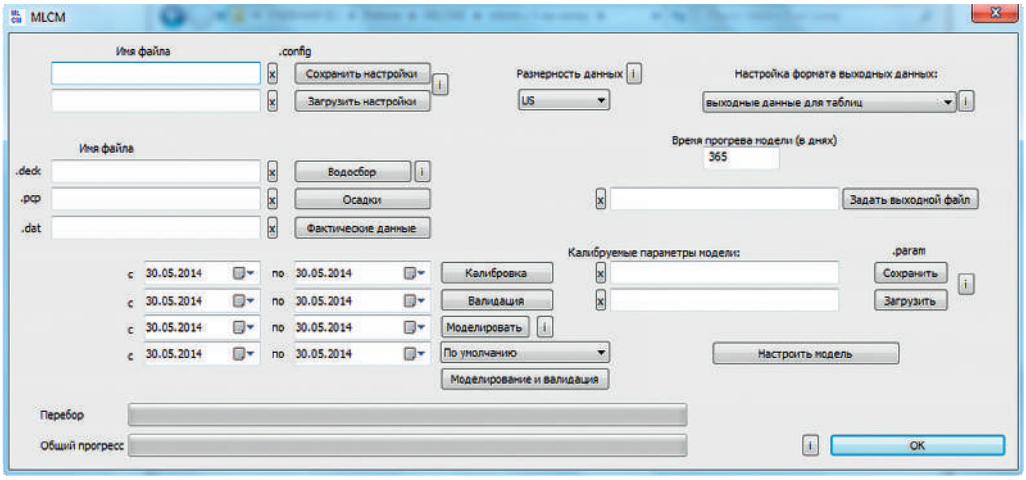


Рис. 1. Интерфейс программного обеспечения «MLCM2.v2»

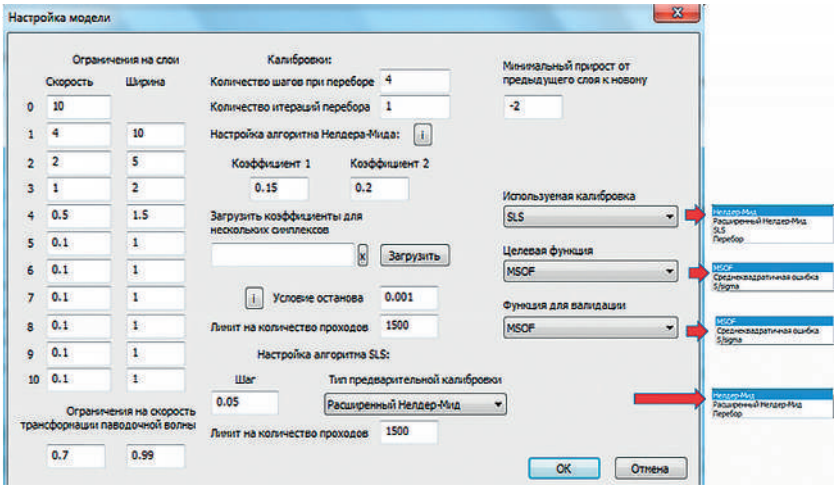


Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения «MLCM2.v2»: настройки модели

Литература

1. *Кузьмин В.А.* Краткосрочное прогнозирование катастрофических половодий и паводков // Метеорология и гидрология. 2001. № 6. — С. 89–95.
2. *Кузьмин В.А., Полякова А.А., Ерёмина С.В. и др.* Автоматизированное прогнозирование опасных гидрологических явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 29. — С. 29–35.

3. *Кузьмин В.А., Дикинис А.В.* Комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и численных прогнозов погоды при автоматизированном прогнозировании стока // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 22. — С. 16–27.
4. *Кузьмин В.А., Коротыгина У.Е., Макин И.С. и др.* Фоновое прогнозирование стока в режиме, близком к реальному времени // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 22. — С. 38–44.
5. *Соколова Д.В., Кузьмин В.А.* Программное обеспечение «MLCM2» для прогнозирования дождевых паводков на малых и средних водосборах // Междунар. научно-исслед. журнал. Екатеринбург. 2015. № 7(38)-4. — С. 137–139.
6. *Соколова Д.В., Кузьмин В.А., Симановская М.В.* Программное обеспечение «MLCM2» для прогнозирования дождевых паводков на малых и средних водосборах // Учен. зап. РГГМУ. 2015. № 40. — С. 55–60
7. *The Guide* to Hydrological Practices (WMO No.168). Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. — WMO, Geneva, 2009. — 302 p.

М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев, Е.Г. Маркова

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА СЕСТРОРЕЦКИЙ РАЗЛИВ РЕЧНЫМИ НАНОСАМИ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

M.V. Shmakova, S.A. Kondratyev, E.G. Markova

SPATIAL AND TEMPORAL PATTERNS OF RESERVOIR SESTRORETSKY RAZLIV SILTING BY RIVER SEDIMENTS (ACCORDING TO MATHEMATICAL MODELING)

По результатам гидродинамического моделирования построены карты заиления и распределения расхода наносов на акватории Сестрорецкого Разлива. Выявлены участки наибольшей интенсивности заиления речными наносами, характеризующиеся относительно активными гидродинамическими процессами в водоеме.

Ключевые слова: заиление, речные наносы, водохранилище, математическая модель.

According to the results of the hydrodynamic modeling maps of silting and sediment discharge distribution in the water area of Sestroretsky Razlive were constructed. Areas of the most intensive silting by river sediments, characterized by a relatively active hydrodynamic processes in the reservoir, were identified.

Keywords: silting, river sediments, reservoir, mathematical model.

Известно, что натурные наблюдения за гидродинамикой водоемов являются трудоемкими и дорогостоящими, а часто и невозможными. В такой ситуации математическое моделирование становится эффективным инструментом исследования различного рода динамических процессов, происходящих в водоеме как на поверхности, так и в толще водной массы. В зависимости от поставленных задач используются модели в одно-, дву- и трехмерной постановках с различной степенью дискретности. Для неглубоких водоемов обычно применяются плановые модели, основанные на уравнениях «мелкой воды». Двумерная постановка допустима при значительном превышении горизонтального масштаба гидродинамических процессов над вертикальным.

Цель настоящей работы — исследование пространственно-временной структуры заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив на основе использования двумерной гидродинамической модели течений, переноса и переотложения наносов, поступивших со стоком рек Сестра и Черная. Работа является продолжением работы по оценке среднегодовых значений заиления Сестрорецкого Разлива, изложенного в работе [8, с. 134].

Водохранилище Сестрорецкий Разлив создано на р. Сестре вблизи ее устья в 1723 г. для нужд Сестрорецкого оружейного завода. Площадь зеркала водоема составляет 10,03 км², средняя глубина — около 2 м, площадь водосбора — 566 км². Основными притоками Сестрорецкого Разлива являются р. Сестра (399 км²) и Черная ($F_{вдсб}$ = 126 км²), сток из водохранилища осуществляется через водосливной канал.

Представляемая в работе гидродинамическая модель водоема основана на уравнениях «мелкой воды» [3, с. 12; 5, с. 46] в двумерной постановке:

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial\left(U^2/H\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(UV/H\right)}{\partial y}+gH\frac{\partial z}{\partial x}=aV+c_a\frac{\rho_a}{\rho_{\text{воды}}}W_xW+D\frac{\partial U^2}{\partial^2 x}-g\frac{UV_{\text{рез}}}{C^2H^2},$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{\partial\left(UV/H\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(V^2/H\right)}{\partial y}+gH\frac{\partial z}{\partial y}=-aU+c_a\frac{\rho_a}{\rho_{\text{воды}}}W_yW+D\frac{\partial V^2}{\partial^2 y}-g\frac{VV_{\text{рез}}}{C^2H^2},$$

$$\frac{\partial z}{\partial t}+\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}=0, \qquad (1)$$

где t — время, с; x и y — координаты, м; U и V — полные потоки по координатным направлениям x и y соответственно, м²/с; $V_{\text{рез}}$ — результирующий полный поток, м²/с; z — уровень на свободной поверхности, м; $H=(h+z)$ — полная глубина, м; h — невозмущенная глубина, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; $a=2\omega\sin\varphi$ — параметр Кориолиса; $\omega=2\pi$/сут. — угловая скорость вращения Земли, рад/сут.; φ — географическая широта, град; c_a — коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности, б/р; ρ_a — плотность атмосферы, кг/м³; $\rho_{\text{воды}}$ — плотность воды, кг/м³; W_x и W_y — компоненты составляющей скорости ветра по координатным направлениям x и y соответственно, м/с; W — результирующий вектор скорости ветра, м/с; C — коэффициент Шези, м^{0,5}/с; D — коэффициент горизонтального турбулентного обмена, б/р.

Коэффициент Шези рассчитывается по формуле Маннинга: $C=(H^{1/6})/n$, где n — параметр шероховатости, б/р. Граничные условия на твердых боковых границах для полных потоков заданы условиями поглощения $U=0$, $V=0$. Уровень определяется из уравнения неразрывности. Граничные условия на открытых боковых границах заданы следующим образом: для стока — условия излучения; для источника — функция времени $U=f_1(t,x,y)$, $V=f_2(t,x,y)$.

Уравнения (1) дополнены аналитической формулой расхода наносов [6, с. 40; 8, с. 58]

$$G=\frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}}-\rho_{\text{воды}}}Q\left[\frac{c}{Hg}-(1-f)\rho_{\text{воды}}I\right], \qquad (2)$$

где G — общий расход наносов, кг/с; Q — расход воды, м³/с; $\rho_{\text{грунта}}$ — плотность грунта, кг/м³; I — уклон дна; f — коэффициент внутреннего трения, б/р; c — сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²).

Формула (2) является следствием основного уравнения движения воды и твердого вещества, выражающего баланс сил, действующих в системе «водный поток – донные отложения – наносы» [6, с. 27]. Формула не имеет эмпирических параметров и апробирована на достаточно большом количестве водотоков, лежащих в различных физико-географических зонах и имеющих разные гидравлические и морфологические характеристики [8, с. 61].

Совместное решение представленных выше уравнений «мелкой воды» и аналитической формулы расхода наносов позволяет вычислять изменения морфометрических характеристик ложа водохранилища. При изменении гидродинамических характеристик потока меняется и его транспортирующий потенциал в отдельных ячейках. В зависимости от изменения транспортирующего потенциала соответствующая масса наносов или осаждается на дно, или, наоборот, вымывается с площади, характеризуемой размером ячейки. Масса осажденного на дно (или размытого) твердого вещества Δ (кг) в расчетной ячейке $[i, j]$ за период времени T рассчитывается по формуле

$$\Delta = \sum_{t=1}^{T} \left[k_{i-1,j} G_{i-1,j}^{t-1} + k_{i+1,j} G_{i+1,j}^{t-1} + k_{i,j-1} G_{i,j-1}^{t-1} + k_{i,j+1} G_{i,j+1}^{t-1} - G_{i,j}^{t} \right], \tag{3}$$

где t — индекс времени; $k_{i,j}$ — весовые коэффициенты проекции скоростей, б/р. Весовые коэффициенты для каждой из четырех соседних ячеек рассчитываются как

$$k_{i-1,j} = \begin{cases} 0 \ \text{при} \ u_{i-1,j}^{t} \le 0, \\ \dfrac{\left| u_{i-1,j}^{t} \right|}{V_{i-1,j\,\text{рез}}^{t}} 0 \ \text{при} \ u_{i-1,j}^{t} > 0, \end{cases}$$

$$k_{i+1,j} = \begin{cases} 0 \ \text{при} \ u_{i+1,j}^{t} \ge 0, \\ \dfrac{\left| u_{i+1,j}^{t} \right|}{V_{i+1,j\,\text{рез}}^{t}} 0 \ \text{при} \ u_{i+1,j}^{t} < 0, \end{cases}$$

$$k_{i,j-1} = \begin{cases} 0 \ \text{при} \ v_{i,j-1}^{t} \ge 0, \\ \dfrac{\left| v_{i,j-1}^{t} \right|}{V_{i,j-1\,\text{рез}}^{t}} 0 \ \text{при} \ v_{i,j-1}^{t} < 0, \end{cases} \tag{4}$$

$$k_{i,j+1} = \begin{cases} 0 \ \text{при} \ v_{i,j+1}^{t} \le 0, \\ \dfrac{\left| v_{i,j+1}^{t} \right|}{V_{i,j+1\,\text{рез}}^{t}} 0 \ \text{при} \ v_{i,j+1}^{t} > 0, \end{cases}$$

где u и v — проекции скорости потока по координатным направлениям x и y соответственно, м/с.

Слой аккумуляции или размыва, мм, рассчитывается по формуле

$$\delta = \Delta \frac{K}{\rho_{\text{грунта}} S} \varphi, \tag{5}$$

где K — коэффициент размерности, равный 10^3; S — площадь расчетной ячейки, м²; φ — плотность залегания грунта (для песка принимается равной 1,3), б/р [4, с. 19].

Уравнения «мелкой воды» (1) решаются полунеявной конечно-разностной схемой. Градиенты уровня и придонное трение аппроксимируются неявно, а адвективные члены, сила Кориолиса и горизонтальный турбулентный обмен — явно [3, с. 12]. Используется метод расщепления по временному слою уравнений движения (уравнение для U на первом временном слое, уравнение для V на — втором) и последующему решению таковых методом трехточечной прогонки по координатным направлениям [3, с. 12]. Уравнение неразрывности решается явно [3, с. 8].

В модели предусмотрена возможность расчета гидродинамических переменных состояния водохранилища со значительно изрезанной береговой линией, моделирования волновых явлений. Разработанная структура интерфейса модели дает возможность изменять параметры расчета, выбирать численные схемы, различные функции стока и источника, условия сохранения результатов моделирования, а также выводить графические результаты расчетов как плановые, так и динамику переменных состояния модели в отдельных точках.

На рис. 1 и 2 приведены интерфейс стартовой формы гидродинамической модели и интерфейс формы «Параметры».

Всего на акватории Сестрорецкого Разлива назначено 4245 расчетных точек. Шаг по времени составил 2 с, по пространству — 50 м. На стационарный режим расчета при U = const, V = const модель выходит примерно через 80 000 расчетных шагов по времени. На рис. 1, 3 и 4 приведены карта глубин, плановая схема течений и распределение скоростей течений на акватории Сестрорецкого Разлива при стационарном режиме расчета. Значения скорости течения воды в акватории крайне незначительно и не превышают несколько миллиметров в секунду. Максимальные значения скорости (несколько сантиметров в секунду) приходятся на места впадения притоков и исток водосливного канала, а также участок транзитного движения водных масс между р. Сестрой и водосливным каналом.

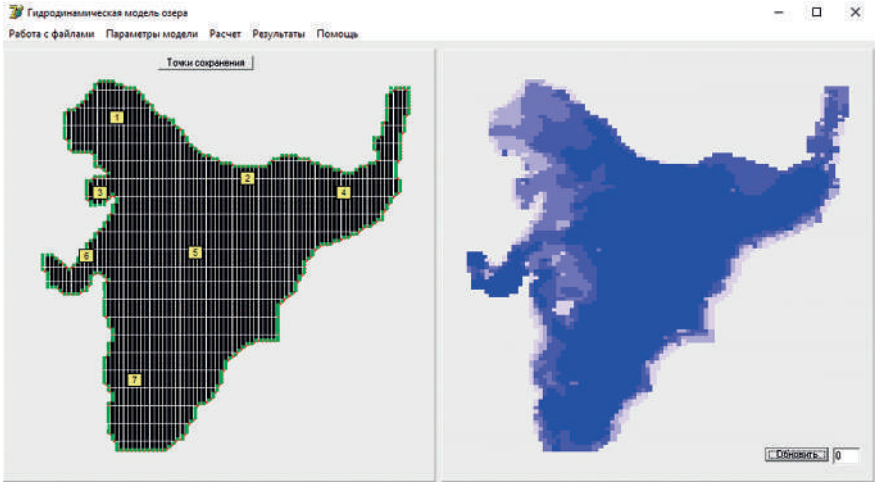


Рис. 1. Интерфейс стартовой формы гидродинамической модели водоема

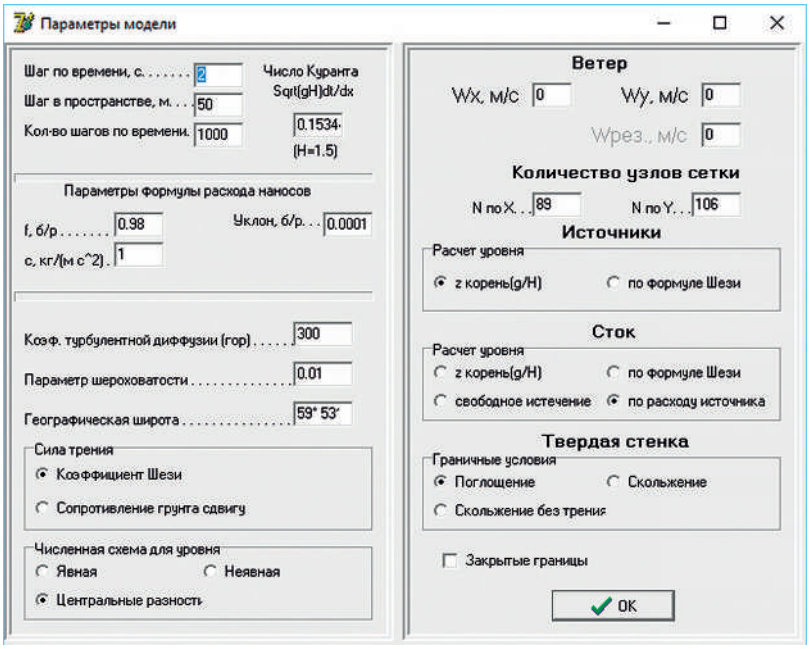


Рис. 2. Интерфейс формы «Параметры»

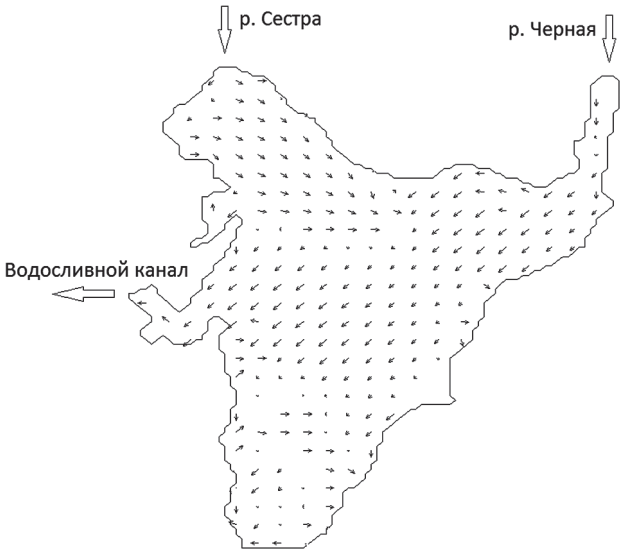


Рис. 3. Плановая схема течений на поверхности акватории Сестрорецкого Разлива при стационарном режиме расчета при расходе воды р. Сестры 2 м³/с

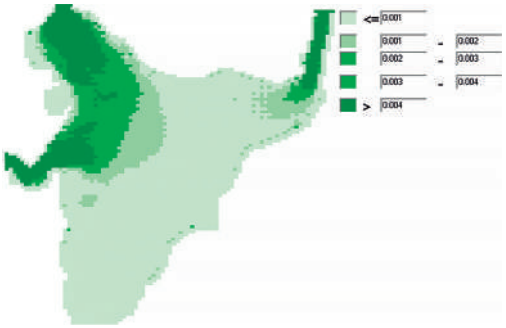


Рис. 4. Распределение скоростей течений (м/с) на акватории Сестрорецкого Разлива в межень при расходе р. Сестры 2 м³/с

На рис. 5 представлено распределение расхода наносов (кг/с) на акватории Сестрорецкого Разлива в меженный период (при расходе воды р. Сестры 2 м³/с) и период половодья (при среднем за половодье расходе воды р. Сестры 20 м³/с). Распределение расхода наносов повторяет распределение скоростей течения. Наибольшие значения расхода наносов приходятся на участки повышенной скорости воды (впадения рек Сестры и Черной и место руслового сужения — Водосливной канал), участок транзитного переноса твердого вещества через акваторию от устья впадающих рек до мест русловых сужений и участок мелководья в западной части Разлива. Значения расходов наносов незначительны и не превышают нескольких грамм в секунду. Это объясняется крайне малыми скоростями течения. В период половодья в отличие от распределения расхода наносов в меженный период область насыщения наносами увеличивается, занимая и центральную часть акватории.

Рис. 5. Схема распределения расхода наносов (кг/с) на акватории Сестрорецкого Разлива в меженный период (*слева*) и период половодья (*справа*)

На рис. 6 представлены карты размыва дна Сестрорецкого Разлива для периода межени при расходе р. Сестры 2 м³/с и периода спада половодья из расчета среднего по водности года (максимальный расход за половодье составил 25 м³/с).

Продолжительность периода — 10 суток. Наибольшая интенсивность донных переотложений приходится, как и на рис. 5, на места русловых сужений и участки транзитного переноса наносов. Десятидневный меженный период характеризуется незначительными скоростями размыва, изменение отметок дна составляет несколько миллиметров.

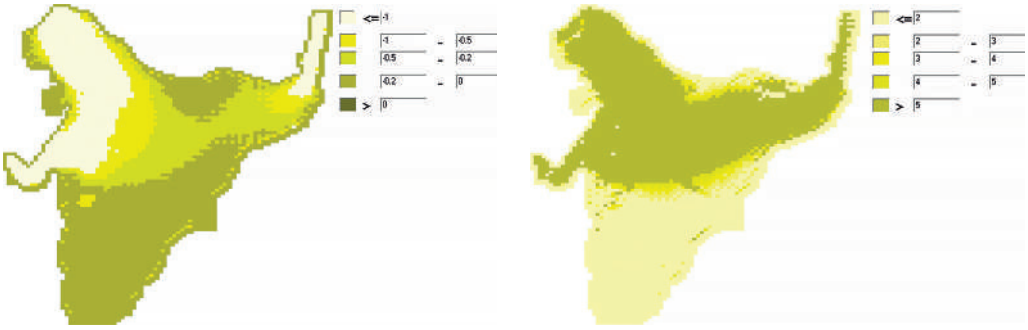


Рис. 6. Схема переформирования дна Сестрорецкого Разлива (мм)
для периода межени — размыв (*слева*) и периода спада половодья — намыв (*справа*)

Как видно из рис. 6, переформирование дна поступающими из притоков речными наносами незначительно по интенсивности и охватывает лишь северную часть акватории. Это вызвано малыми значениями скорости воды и, как следствие, слабой циркуляцией водных масс в акватории. Однако, учитывая небольшую глубину водоема, на перераспределение поступающих в водоем речных наносов значительное влияние оказывает ветровое перемешивание. На рис. 7 и 8 приведены плановые схемы течений и расхода наносов при задании постоянного по направлению и скорости ветра в течение суток в меженный период (расход р. Сестры — 2,0 м³/с, р. Черной — 0,5 м³/с). Для численного эксперимента выбрано доминирующее в летнюю межень направление ветра — западное [2, с. 35]. Скорость ветра для расчета принята равной 5,0 м/с. Как видно из рис. 8, основные пути транспорта наносов приходятся на северную (участок притоков), западную мелководную и центральную части акватории.

Особенности морфометрии Сестрорецкого Разлива, а также расположение источников и стока относительно друг друга способствуют неравномерному распределению поступивших с притоками речных наносов. Это отражается как на значениях расходов наносов, так и интенсивности переформирования дна. Очевидно, что распределение речных наносов является функцией скорости течения, наиболее выраженной в северной части водоема.

Относительно активная циркуляция водных масс в северной части Разлива происходит за счет впадающих речных потоков. Однако даже в этой части акватории скорости течения в межень достигают нескольких сантиметров в секунду, тогда как в центральной и южной частях Разлива скорости течения на порядок меньше. Расходы наносов в северной части акватории в период межени составляют лишь несколько грамм в секунду, тогда как в половодье с увеличением скорости течения могут достигать нескольких десятых долей килограмма в секунду.

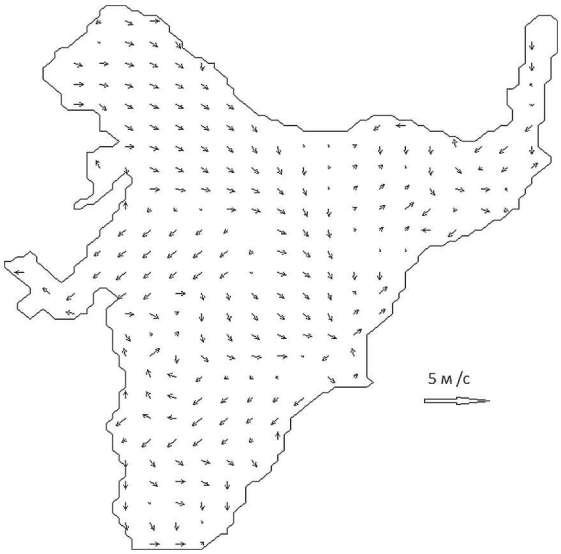


Рис. 7. Плановая схема течений на поверхности акватории Сестрорецкого Разлива при стационарном режиме расчета при западном ветре 5 м/с

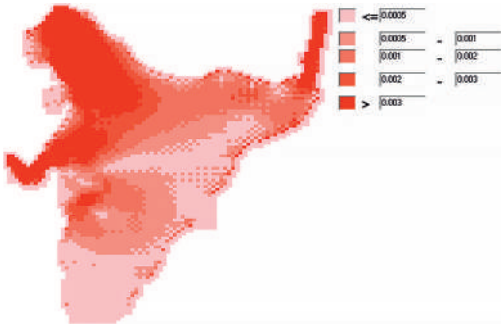


Рис. 8. Распределение расхода наносов (кг/с) на акватории Сестрорецкого Разлива в меженный период при расходе воды р. Сестры 2 м³/с при западном ветре 5 м/с

Интенсивность процессов переформирования дна речными наносами также неодинакова в течение года. В меженный период происходит незначительный размыв (в пределах 0–1,5 мм за декаду) в южной части водохранилища. Однако наибольшие скорости размыва дна приходятся на период подъема половодья. Максимальные значения размыва в этот период для среднего по водности года достигают 2–5 мм за декаду. Интенсивный процесс аккумуляции речных наносов приходится на период спада половодья, когда скорости течения начинают снижаться, транспортирующий потенциал потока уменьшается, что приводит к осаждению наносов. Максимальные значения намыва в этот период составляют 6–9 мм за декаду.

Обобщая результаты моделирования для различных внутригодовых фаз водности (летняя межень, подъем и спад половодья), можно сделать вывод, что интенсивность намыва дна речными наносами в северной части акватории составляет около 3–4 мм/год. Однако в среднем по водохранилищу эта величина будет на порядок меньше, что хорошо согласуется с результатами расчетов, полученными ранее [1, с. 250]. Ветровое перемешивание приводит к перераспределению донных отложений по акватории. При преимущественных ветрах западных направлений в процессы переформирования дна включается и центральная часть Сестрорецкого Разлива.

Литература

1. *Водные* объекты Санкт-Петербурга / под ред. С.А. Кондратьева, Г.Т. Фрумина. — СПб.: Символ, 2002. — 348 с.
2. *Научно-прикладной* справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 3. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
3. *Рахуба А.В.* Пространственно-временная изменчивость качества вод Саратовского водохранилища в условиях неустановившегося гидродинамического режима: Автореф. дис. ... канд. тех. наук / Рос. науч.-ис. ин-т комплексного использ. и охраны водных ресурсов. — Екатеринбург, 2007.
4. *Рекомендации* по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов СО 34.21.204-2005. ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». — СПб., 2006.
5. *Филатов Н.Н.* Динамика озер. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 166 с.
6. *Шмакова М.В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. — СПб.: Изд-во «Лема», 2013. — 142 с.
7. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А.* Оценка заиления водохранилищ по данным о годовом твердом стоке притоков (на примере Сестрорецкого Разлива) // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 34. — С. 134–141.
8. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А.* Анализ и расчеты твердого стока (на примере североамериканских рек) // Учен. зап. РГГМУ. 2016. № 43. — С. 51–66.

Авторы выражают глубокую благодарность за ценные замечания и рекомендации при наладке гидродинамической модели д.ф.-м.н. Владимиру Алексеевичу Рябченко (ИО РАН), к.т.н. Александру Владимировичу Рахубе (ИЭВБ РАН) и Екатерине Александровне Шипуновой (ИНОЗ РАН).

Г.Н. Войнов

ПРИЛИВЫ В ОБСКОЙ ГУБЕ (КАРСКОЕ МОРЕ). I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИЛИВОВ

G.N. Voinov

TIDES IN THE GULF OF OB (KARA SEA). I. GENERAL CHARACTERISTICS OF TIDE

В первой части работы представлены гармонические постоянные приливов с помощью МНК по версии ААНИИ для всех пунктов стационарной сети в Обской губе за период 70–90-х гг. XX в. и по материалам экспедиционных наблюдений в начале 2000-х гг. На основе результатов гармонического анализа приливов построены новые карты приливных волн M_2 и K_1 для летнего и зимнего периодов.

Ключевые слова: гармонические постоянные волн M_2 и K_1 для летнего и зимнего периодов, корты приливов волн M_2 и K_1.

The first part of the research are given the harmonic constants of tides using the least-squeres method version of AARI for all points of the fixed network in the Gulf of Ob in the period 70–90-ies of XX century and on the materials of the expedition of cases in the early 2000s. On the basis of the results of harmonic analysis of tides built a new map of the tidal waves M_2 and K_1 for summer and winter periods.

Keywords: The harmonic constants of M_2-tide and K_1-tide and cotidal maps for summer and winter periods.

Состояние вопроса. Наблюдения за уровнем моря (использованные материалы)

Наблюдения за колебаниями уровня в Обской губе (включая Тазовскую губу) были начаты в 20–30-е гг. XX в. в связи с описью и съемкой берегов и промерами глубин при производстве гидрографических работ. Эти наблюдения также выполнялись специальными портоизыскательскими экспедициями с целью освоения и развития Северного морского пути. Однако эти измерения производились кратковременными сериями длительностью 15 или 30 суток (в редких случаях — до 2–3 месяцев) только в летний, навигационный, период (июль–сентябрь) и носили нерегулярный характер. При этом измерения колебаний уровня моря выполнялись следующими способами: по футштоку (рейке) или по сваям, а с 50–60-х гг. с помощью самописца уровня моря СУМ (типа «Валдай») или по мареографу ГМ-28 (гидростатического типа). Эти наблюдения и в настоящее время представляют большую ценность для исследования приливов. Сведения о наблюдениях за колебаниями уровня в Обской губе по 1950 г.

приведены в [11, 12], а результаты обработки приливов гармоническим анализом помещены в справочнике [11].

Регулярные круглогодичные ежечасные и срочные наблюдения за уровнем моря были организованы на полярных станциях в 50–70 гг. XX в. Характеристика данных, собранных на этих станциях, и оценка качества материалов наблюдений за уровнем с точки зрения репрезентативности станций и возможности получения достоверных сведений дана более развернуто в [17].

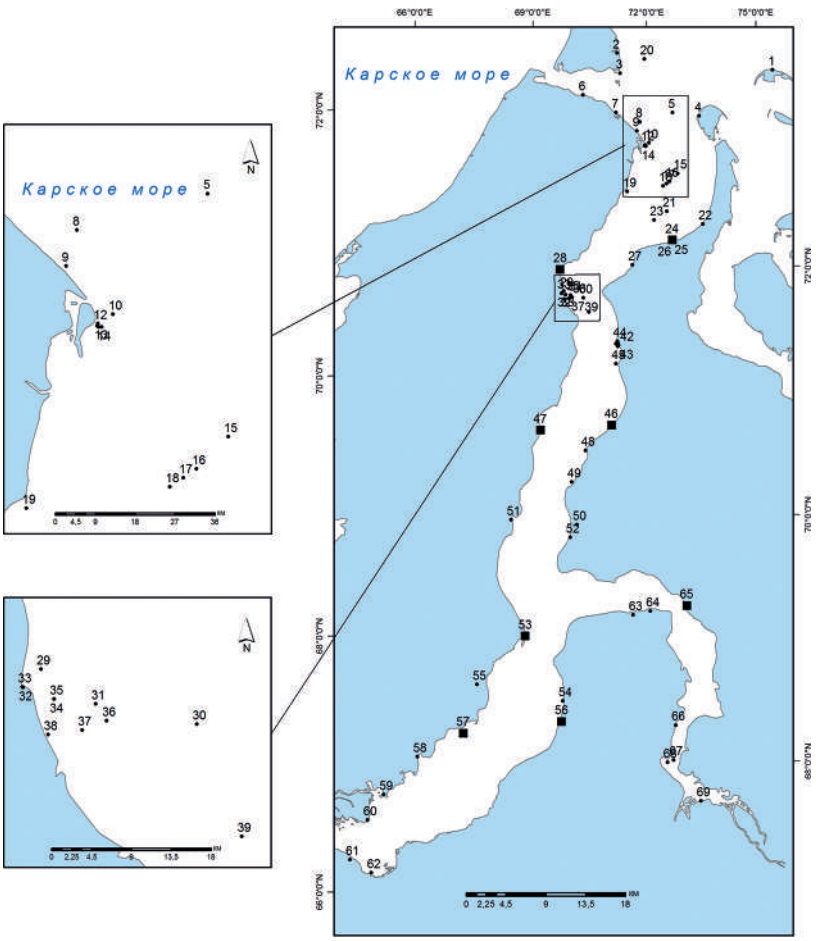
Здесь выше мы касались тех данных, основа которых была создана в рамках стратегического проекта освоения Крайнего севера и, в частности, обеспечения функционирования Северного морского пути, разработанного в Советском Союзе. После развала СССР эти проекты оказались не обеспечены государственным финансированием, поэтому начались негативные процессы разрушения (закрытие) сети полярных станций, оттока специалистов, технического старения стандартной приборной базы. Это привело к постепенному падению качества наблюдений, которое началось с середины 1980-х гг. (на некоторых пунктах даже раньше), вплоть до частичной или полной их фальсификации (измерения «рисуют», не выходя к футштоку). Процесс разрушения сети в настоящее время не остановлен [10]. Можно констатировать, что программа наблюдений за уровнем моря, реализуемая в настоящее время на полярных станциях в виде срочных измерений по футштоку, безнадежно устарела со всех точек зрения и не обеспечивает задачу мониторинга арктических морей [6].

Параллельно с процессами деградации сети полярных станций началось освоение шельфа арктических морей. Для гидрометеорологического обеспечения производства работ на шельфе, строительства инженерных сооружений и портов с середины 2000-х гг. в Обской губе были выполнены обширные наблюдения за уровнем. Они производились на буйковых станциях с помощью устройства АДСР (доплеровский профилограф) и различных приборов гидростатического типа. Эти сведения о наблюдениях за уровнем моря, полученных в летних и зимних экспедициях ААНИИ показаны на рис. 1. В табл. 1 представлены все использованные нами материалы ежечасных и срочных данных на стационарных постах. К сожалению, в нашем распоряжении нет материалов, полученных другими научными учреждениями, проводившими аналогичные изыскания в Обской губе в 2000-е гг.

Контроль качества многолетних временных рядов наблюдений уровня на стационарных постах. Коррекция брака и приведение этих рядов к однородным базам данных

Поскольку имеющиеся ранее базы данных не были приведены к однородным рядам и не имели оценки качества, то такие базы данных в принципе не пригодны для получения объективных оценок гармонических постоянных приливов. Например, срочные наблюдения на м. Тамбей — с 1989 г., в Новом Порту — с 1989 г, а на м. Каменный — с 1986 г. полностью непригодны для получения оценок приливов и производства статистических расчетов. Годовые ежечасные серии за отдельные годы в Тадибеяхе, Сеяхе, Антипаюте показали на первичном этапе обработки нереальные оценки констант волн приливов. Подобные сомнительные срочные наблюдения

подвергались коррекции по методике, изложенной в [2, 4, 6]. К ежечасным рядам наблюдений применялась обработка по способу калибровки приливов [5].



Пункты с оценками гармонических постоянных приливов в Обской губе из анализа кратковременных и многолетних наблюдений за уровнем моря

- 1, о.Вилькицкого
- 2, устье р. Нябипага-Яха
- 3, мыс Шуберта
- 4, о.Шокальского
- 5, АБС 1. гор. 24 м
- 6, устье р. Яходы-Яха
- 7, залив Холе-Пага
- 8, АБС 2. гор. 15 м
- 9, АБС 3. гор. 7 м
- 10, АБС. гор. 7 м о. Халэвнго
- 11, АБС. гор. 7 м о. Халэвнго
- 12, мыс Дровяной
- 13, АБС. гор. 7м о. Халэвнго
- 14, АБС. гор. 7м о. Халэвнго
- 15, АБС. гор. 13 м
- 16, АБС. гор. 11 м
- 17, АБС. гор. 11 м
- 18, АБС. гор. 11 м
- 19, АБС. гор. 8 м
- 20, АБС. гор. 13 м
- 21, АБС. гор. 13 м
- 22, устье р. Сабуле-Яха
- 23, АБС. гор. 14 м
- 24, П/ст им. 60-летия ВЛКСМ (Нгарка)
- 25, АБС. гор. 8 м
- 26, АБС. гор. 8 м
- 27, устье р. Луци-Яха
- 28, П/ст Тамбей
- 29, АБС. гор. 6 м
- 30, АБС. гор. 18 м
- 31, АБС. гор. 14 м
- 32, АБС. гор. 4 м (порт Сабетта)
- 33, АБС. гор. 1 м (причал Сабетта)
- 34, АБС. гор.9 м
- 35, АБС. гор.8 м
- 36, АБС. гор. 14 м
- 37, АБС. гор. 16 м
- 38, АБС. гор. 5 м (порт Сабетта)
- 39, АБС. гор. 20 м
- 40, АБС. гор. 10 м
- 41, АБС. гор. 1 м
- 42, АБС. гор. 5 м
- 43, АБС. гор. 10 м
- 44, мыс Сабу-То
- 45, АБС. гор. 9 м
- 46, П/ст Тадибеяха
- 47, П/ст Сеяха
- 48, мыс Напалкова
- 49, АБС. гор. 9 м
- 50, мыс Котельникова
- 51, мыс Яптик-Сале
- 52, устье р. Хампуль-Яха
- 53, П/ст мыс Каменный
- 54, мыс Грдины
- 55, устье р. Исидерма
- 56, П/ст Ямбург
- 57, П/ст Новый порт
- 58, бухта Находка
- 59, мыс Ям-Сале
- 60, о-ва Варнинские
- 61, устье р. Шуга
- 62, устье р. Надым
- 63, устье р. Широкая
- 64, мыс Поворотный
- 65, П/ст Антипаюта
- 66, устье р. Хорлянка
- 67, АБС. гор. 3 м (Юрхарово)
- 68, АБС. гор. 2 м (Юрхарово)
- 69, мыс Нарсо-Мя-Сале

Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений за уровнем моря, полученных в летних и зимних экспедициях ААНИИ в Обской и Тазовской губах за период с 1935 (1928) по 2013 г.

Таблица 1

Пункты стационарной сети с оценками гармонических постоянных приливов в Обской губе

№ по карте	Пункт наблюдений	Широта северная	Долгота восточная	Период обработки	Вид наблюдений
1	Остров Вилькицкого	73 31,5	75 46	1939 (08–09), 1940 (08–09), 1957 (03–04); *1960–1974*	Рейка, СУМ; Рейка, зима
24	Им. 60-летия ВЛКСМ (Нгарка)	71 58,0	74 20,0	1982 (09–10), 1984 (11)–1985 (05); *1978–1992*	СУМ СУМ Рейка
28	Тамбей	71 28	71 49	1938 (07–09), 1939 (07–09), 1951 (04–05), 1976 (03–06), 1979 (08–09); *1976–1995*	Рейка Рейка, СУМ СУМ; рейка
46	Тадибеяха	70 22	74 08	**1974–1988;** *1989–1993*	СУМ; Рейка
53	Мыс Каменный	68 30	73 35	1936 (07–08), 1971 (04–05); **1947–1948;** *1977–1994*	Рейка; СУМ; рейка
56	Ямбург	67 54	74 50	*1984–1987*	Рейка
57	Новый порт	67 35	72 55	1938 (07–09), 1939 (07–09), 1977 (08), 1979 (04–09); *1977–2012*	Рейка, СУМ; Рейка
59	Мыс Ям-Сале	66 54	71 45	1920 (07–08), 1935 (07–08), 1937 (07–09), 1938 (07–09), 1939 (07–09), 1940 (08–09)	Рейка
65	Антипаюта	69 05	76 51	**1977–1988**	СУМ

Примечание. СУМ ежечасные измерения по мареографу; рейка измерения по футштоку; зима срочные измерения по футштоку только в зимний период с припая. Многолетние ежечасные регулярные измерения в графе период обработки выделены жирным шрифтом; многолетние срочные измерения (4 срока в сутки) выделены курсивом.

Детальную оценку результатов изложенной выше процедуры применительно к наблюдениям на стационарных постах Обской и Тазовской губ здесь мы не приводим. Это является предметом отдельной работы. В настоящее время в полном виде оценка приливов по наблюдениям представлена только в Новом Порту в [6]. В обобщенном виде результаты оценок качества наблюдений на стационарных постах Обской и Тазовской губ сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценок качества многолетних наблюдений за уровнем на стационарных постах Обской и Тазовской губ

Пункт	Период анализа, сут.	Количество пропусков, сут.	Количество замен брака, сут.	Общее количество пропусков и брака, сут.	Примечание
Нгарка (60 лет ВЛКСМ)	1977–1992 5114	634	1651	2285 (44,7 %)	Срочные
		15	1285	1300 (25,4 %)	Без 1979, 1980, 1991, 1992
Тамбей	1978–1995 6574	1549	2668	4217 (64,1 %)	Срочные
		602	2365	2967 (45,1 %)	Без 1978, 1979, 1989, 1995
Тадибеяха	1974–1993 7305	613	2347	2960 (40,5 %)	1974–1988 ежеч.; 1989–1993 срочные

Окончание табл. 2

Пункт	Период анализа, сут.	Количество пропусков, сут.	Количество замен брака, сут.	Общее количество пропусков и брака, сут.	Примечание
Сеяха	1977–1992 5844	372	1937	2309 (39,5 %)	Ежечасные
Каменный	1977–1994 6574	560	2262	2822 (42,9 %)	Срочные
Новый Порт	1977–2012 13149	1227	5170	6397 (48,6 %)	Срочные
Антипаюта	1977–1988 4383	409	598	1007 (23,0 %)	Ежечасные

Примечание. В скобках даны значения в процентах длины ряда. Для станций Нгарка и Тамбей даны сведения, средние для всех данных и без годовых серий с аномально большими пропусками наблюдений.

Из данных табл. 2 видно, что в целом ежечасные измерения уровня имеют меньше пропусков и коррекций брака по сравнению со срочными наблюдениями. Самые плохие срочные наблюдения отмечены в Тамбее и Новом Порту. По-видимому, это связано с особенностями расположения мест измерений уровня и условий наблюдений на этих постах.

Обзор данных табл. 2 убедительно свидетельствует о необходимости технического переоснащения постов современными автономными измерительными комплексами с непрерывной регистрацией колебаний уровня моря.

Методика обработки и гармонического анализа приливов (общие положения)

Первые сведения о приливах Обской губы с результатами гармонического анализа содержатся в работах [9, 11, 12, 13, 16, 18]. Гармонический анализ наблюдений выполнялся по методу Дарвина за 15 или 30 сут. Контроль вычислений, как правило, производился с помощью визуального сравнения наблюдений и предвычисленного ряда на несколько суток. Очевидно, что такой прием позволял выявить только грубые промахи при вычислении основных полусуточных волн, а ошибки расчета суточных волн, имеющих намного меньшие по величине амплитуды, оставались не выявленными. Например, в работах [9, 18] углы положений суточных волн K_1 и O_1 в пунктах Обской губы даны с ошибками в 180°. В справочнике [11] эти явные ошибки были частично устранены, но имелись другие ошибки. Вследствие недоработки методологии и отсутствия критериев оценок точности констант волн прилива в этих данных содержатся иногда ошибочные сведения (например, в сведениях по приливам в пунктах м. Дровяной, м. Харсе (м. Напалкова), о-ва Варнинские и т.д.). Наиболее частая причина — неверное определение времени измерений (пояса). Причем иногда оно (время) неверно указывалось самими наблюдателями. Это было вызвано тем, что применялось в разные годы различными экспедициями в разных пунктах время измерений местное (до апреля 1961 г.) или московское (3 пояс), до 4–6 пояса.

Практически все материалы исторических наблюдений (точнее, их копии) сохранились в фондах ААНИИ, поэтому данные материалы нами были заново обработаны по новой методологии [1, 4]. Наиболее ценные сведения были получены из многолетних

ежечасных и срочных наблюдений на полярных станциях Нгарка (60 лет ВЛКСМ), Тамбей, Тадибеяха, Сеяха, Каменный, Новый Порт, Ямбург и Антипаюта. В этих пунктах была получена сезонная изменчивость основных суточных и полусуточных волн приливов (рассчитаны средние векторные значения гармонических постоянных на каждый месяц года) и определены долгопериодные приливы. В табл. 3 и табл. 4 приведены новые оценки гармонических постоянных волн M_2 и K_1 для августа и апреля. В случае наличия нескольких серий наблюдений в пункте эти оценки определялись как средние векторные значения на данный месяц.

Таблица 3

Гармонические постоянные волны M_2 (на август) и волны K_1 (на август) в Обской губе (H — амплитуда, см; g — угол положения в 0 поясе, град)

№ п/п	Номер по рис. 1	Название пункта	Волна M_2		Волна K_1	
			H	g	H	G
1	1	о. Вилькицкого	17,1	211	4,1	212
2	2	р. Нябипага-Яха	38,4	235	8,5	208
3	4	о. Шокальского	12,5	274	5,4	250
4	5	АБС 1, гор. 24 м	16,8	255	6,1	216
5	6	р. Яходы-Яха	20,1	233	10,2	183
6	8	АБС 2, гор.15 м	37,6	263	10,5	234
7	9	АБС 3, гор. 7 м	32,7	264	9,1	234
8	11	АБС, гор. 7 м	41,0	291	8,0	244
9	12	м. Дровяной	53,6	286	6,3	252
10	13	АБС, гор. 7 м	43,6	289	9,2	248
11	14	АБС, гор. 7 м	41,1	291	8,0	242
12	15	АБС, гор. 13 м	35,1	320	7,8	259
13	16	АБС, гор. 11 м	38,1	322	7,7	261
14	17	АБС, гор. 11 м	38,9	323	8,1	259
15	18	АБС, гор. 11 м	41,6	324	8,2	262
16	19	АБС, гор. 8 м	53,9	333	9,9	264
17	20	АБС, гор. 13 м	46,8	332	8,9	267
18	21	АБС, гор. 13 м	39,1	336	6,2	267
19	22	р. Сабуле-Яха	30,9	344	5,2	247
20	23	АБС, гор. 14 м	40,1	337	6,0	268
21	24	Нгарка	35,9	346	7,3	285
22	25	АБС, гор. 8 м	36,2	346	5,6	251
23	26	АБС, гор. 8 м	35,2	348	6,5	270
24	27	р. Луци-Яха	33,2	12	5,2	281
25	28	Тамбей	46,9	28	5,8	308
26	29	АБС, гор. 6 м	40,5	35	6,0	299
27	30	АБС, гор. 18 м	33,6	34	5,6	307

Окончание табл. 3

№ п/п	Номер рис. 1	Название пункта	Волна M_2		Волна K_1	
			H	*g*	*H*	*G*
28	31	АБС, гор. 14 м	38,5	34	8,0	315
29	32	АБС, гор. 4 м (порт Сабетта)	40,6	38	7,0	310
30	33	АБС, гор. 1 м	40,4	39	7,1	312
31	34	АБС, гор. 9 м	38,9	36	7,8	315
32	36	АБС, гор. 14 м	37,8	34	7,4	307
33	37	АБС, гор. 16 м	38,2	38	7,8	306
34	39	АБС, гор. 20 м	28,7	47	6,7	320
35	40	АБС, гор. 10 м	17,3	92	4,0	350
36	41	АБС, гор. 1 м	17,6	98	3,4	318
37	42	АБС, гор. 5 м	18,4	96	5,5	329
38	43	АБС, гор. 10 м	18,8	96	4,6	343
39	44	Сабу-То	16,4	96	4,8	5
40	45	АБС, гор. 9 м	19,9	112	4,7	356
41	46	Тадибеяха	24,2	146	3,9	349
42	47	Сеяха	24,9	171	4,6	6
43	48	м. Напалкова	24,5	164	3,2	2
44	49	АБС, гор. 9 м	23,2	174	5,0	20
45	50	м. Котельникова	16,2	206	2,1	29
46	51	м. Яптик-Сале	17,4	252	2,2	(73)
47	52	р. Хампуль-Яха	14,0	212	3,0	31
48	53	Каменный	19,3	311	3,0	84
49	54	м. Грдины	5,0	55	2,0	42
50	55	р. Исидерма	15,1	14	2,8	62
51	56	Ямбург	5,9	23	1,3	117
52	57	Новый Порт	13,4	71	2,4	136
53	58	б. Находка	16,1	127	5,1	173
54	59	м. Ям-Сале	9,5	216	1,2	243
55	60	о. Варнинские	6,3	272	1,6	245
56	61	р. Шуга	5,1	343	2,7	294
57	62	р. Надым	4,5	353	1,2	266
58	63	р. Широкая	17,8	338	2,1	57
59	64	м. Поворотный	17,8	341	3,0	91
60	65	Антипаюта	11,3	30	1,3	126
61	66	р. Хорлянка	6,6	197	2,9	247
62	67	АБС, гор. 3 м	5,6	265	0,9	238
63	68	АБС, гор. 2 м	5,0	288	0,5	318
64	69	м. Нярсо-Мя-Сале	1,7	15	0,5	15

Таблица 4

Гармонические постоянные волны M_2 (на апрель) и волны K_1 (на апрель) в Обской губе (H — амплитуда, см; g — угол положения в 0 поясе, град)

Номер п/п	Номер по табл. 1	Название пункта	Волна M_2		Волна K_1	
			H	g	H	g
1	1	о. Вилькицкого	15,8	258	3,4	245
2	2	р. Нябипага-Яха	27,7	266	5,8	242
3	3	м. Шуберта	28,7	276	6,6	234
4	7	з. Холе-Пага	32,0	293	6,9	251
5	10	АБС, гор. 7 м	33,1	336	7,8	264
6	24	Нгарка	20,3	48	4,5	307
7	28	Тамбей	18,0	94	3,7	311
8	30	АБС, гор. 18 м	19,0	90	4,0	329
9	35	АБС, гор. 8 м (порт Сабетта)	19,1	99	3,5	321
10	38	АБС, гор.5 м	19,6	85	4,2	348
11	46	Тадибеяха	6,8	218	1,8	48
12	47	Сеяха	4,4	285	1,1	34
13	48	м. Напалкова	6,7	291	1,4	109
14	50	м. Котельникова	3,5	286	1,1	65
15	51	м. Яптик-Сале	6,2	342	1,5	(91)
16	53	м. Каменный	3,9	44	1,0	110
17	56	Ямбург	1,4	129	0,5	164
18	57	Новый порт	1,4	236	0,3	298
19	58	б. Находка	2,3	251	1,1	116
20	65	Антипаюта	2,1	163	0,4	238

Гармонический анализ приливов по датчикам давления

Измерения колебаний уровня моря в экспедициях ААНИИ в 2000-е гг. выполнялись по датчику гидростатического давления устройства АДСР или с помощью других приборов гидростатического типа с дискретностью 15 и 10 мин. Данные были переведены в метрическую систему после учета поправок за атмосферное давление.

Заданная при постановке дискретность измерений позволила применить сглаживающие фильтры для понижения уровня высокочастотного шума [20]. При этой процедуре происходит укорочение длины временного ряда на 34 (при дискретности 15 мин) или 52 (при дискретности 10 мин) значения. Затем производилась выборка ежечасных значений (децимация).

Для ежечасных временных рядов колебаний уровня моря нами разработан способ контроля и редакции случайных выбросов [2]. Контроль по программе временных рядов производился с заданием критерия отклонения более 6 см. Далее ежечасные временные ряды подвергались фильтрации фильтром нижних частот Д49 для подавления влияния непериодических колебаний. С целью устранения срезки при фильтрации

(48 значений ряда теряется) временные ряды предварительно дополнялись в начале и конце рядов с помощью предвычисления. Затем по полученным временным рядам производился гармонический анализ приливов с помощью МНК по методике, разработанной в ААНИИ [1, 4].

Продолжительность наблюдений в основном колебалась от 20 до 66 суток, поэтому возможность выделения основных волн прилива по ряду пунктов была различной. Для описания прилива в настоящее время наименьшим оптимальным периодом считается месячная серия измерений. Более короткие серии могут быть использованы с известными допущениями, но годятся в основном только для разведочного предварительного анализа. При выборе списка волн для анализа в целом мы следовали критерию Рэлея. Отступление от этого правила было сделано для волны N_2, которая, как показали эксперименты, надежно разрешается по рядам с хорошим качеством измерений при длительности около 20 суток (критерий Рэлея требует 28 суток). Однако волны Q_1, J_1, L_2, μ_2 и другие не были включены в анализ для периодов менее 30 суток, так как они ненадежно разрешаются по таким данным. Но их амплитуда в этой акватории мала и не влияет на разрешение других волн. В целом было выделено от 18 до 32 волн для периодов от 20 до 60 суток соответственно в суточном, полусуточном, 1/3-суточном, 1/4-суточном и 1/6-суточном классах прилива.

Результаты по волнам K_1, S_2, N_2 во втором приближении исправлялись от влияния второстепенных волн соответственно π_1, S_1, ψ_1, φ_1, P_1; K_2, T_2, R_2, ν_2 по теоретическим соотношениям.

По фурье-анализу остаточных рядов (наблюдения минус предвычисления) были рассчитаны средние уровни шума, средние квадратические отклонения в классах приливов и по ним определены 95 % доверительные интервалы для оценки точности. Эти значения в суточном, полусуточном, 1/3-суточном, 1/4-суточном и 1/6-суточном классах прилива в целом, соответственно, равны ±1,86–1,33; ±2,63–0,76; ±0,35–0,18; ±0,47–0,12; ±0,29–0,14 см. При этом большие значения (по абсолютной величине) в этих границах относятся к коротким рядам наблюдений (15–20 суток), а меньшие — к продолжительным измерениям (40–60 суток).

Для исследования приливов в конкретном пункте иногда бывает достаточно одной месячной или, в крайнем случае, даже полумесячной серии ежечасных измерений. Но в Обской губе отмечается сильная сезонная изменчивость приливов и течений. Ранее зачастую ограничивались обработкой и публикацией в Таблицах приливов [19] наблюдений в летний период (август – сентябрь). Конечно, предвычисление приливов на годовой цикл по таким гармоническим постоянным может быть не только не полным, но и ошибочным. Расчет приливов должен производиться как минимум раздельно на летний и зимний периоды, а точнее — на каждый месяц года по соответствующей этому месяцу модели прилива.

Гармонический анализ долгопериодных колебаний и приливов

Для выделения этого класса приливов использовались среднесуточные значения уровня за весь период наблюдений в пунктах Нгарка (60 лет ВЛКСМ), Тамбей, Тадибеяха, Сеяха, Каменный, Новый Порт и Антипаюта. Применялась методика, изложенная в [1].

В долгопериодном классе как правило 7 волн (*Sa*, *Ssa*, *Sta*, *Sqa*, *Mm*, *MSf*, *Mf*) превысили 95 % доверительный интервал. При этом годовая *S*a, полугодовая *S*sa, третьгодовая *S*ta и четвертьгодовая *S*qa гармоники практически не являются строго приливными, а так называемыми метеорологическими и описывают сезонный ход уровня моря.

Спектр колебаний уровня моря по наблюдениям. Распределение энергии колебаний

Спектр колебаний уровня по ежечасным наблюдениям в пункте Се-Яха за 1977 г. рассчитан по алгоритму Г. Дженкинса, Д. Ваттса [7] в стационарном приближении. Основные черты колебаний уровня в синоптическом и мезомасштабном диапазонах спектра хорошо представлены на этом графике (рис. 2), несмотря на аномально сильную сезонную изменчивость прилива в годовом цикле. На кривой спектра выделяются пики, соответствующие приливным вкладам на периодах 1, 0,5 сут. и 6, 4 и 3 ч (рис. 2, *а*). Они отражают суточные, полусуточные и мелководные приливы. Причем 1/4-суточные и 1/6-суточные приливы вследствие сильно выраженного сезонного хода недостаточно описываются без учета их сезонного хода с помощью специальных сложных волн (см. рис. 2, *б*). Эти волны были открыты и введены нами в гармонический анализ в 2005 г. [3].

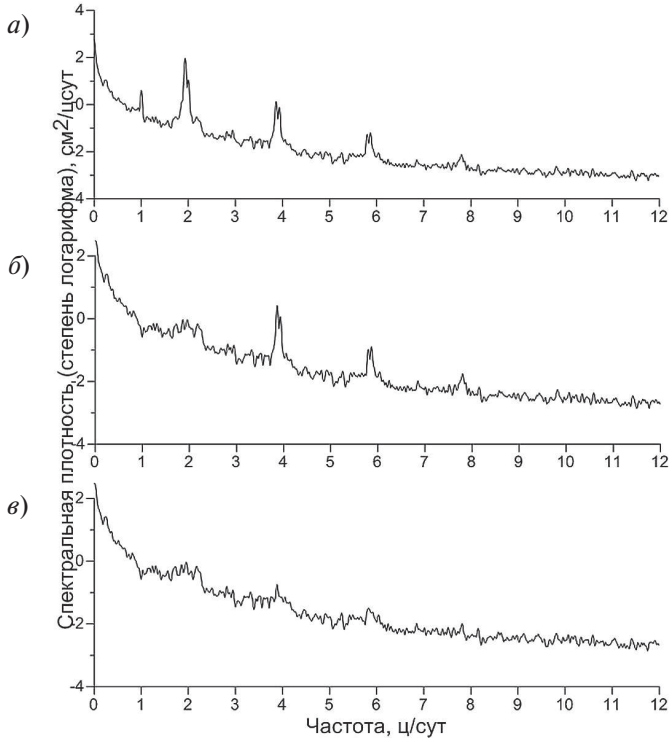


Рис. 2. Спектр ежечасных наблюдений за уровнем в Сеяхе за 1977 г. (*а*), спектр остаточного ряда этой серии (наблюдения минус предвычисления) по программе МНК без учета сезонного хода 1/4- и 1/6-суточных волн (*б*), спектр остаточного ряда по программе МНК с учетом сезонного хода этих волн (*в*). Число степеней свободы равно 22

Оценку спектральных вкладов произведем по результатам гармонического анализа прилива. Гармонический анализ наблюдений за 1977 г. проведен по расширенной версии МНК с описанием сезонного хода основных суточных, полусуточных и мелководных волн. В целом 104 волны по амплитуде были выше 95 % доверительного интервала в своей полосе частот. По значениям амплитуд волн можно рассчитать дисперсию прилива общую и в отдельных классах прилива. Для этого мы применили известную формулу

$$D = \sum A^2/2, \qquad (1)$$

где A — амплитуда волны прилива.

Дисперсия наблюденных колебаний уровня моря за период наблюдений составила 550,00 см², а общая дисперсия прилива (с долгопериодными колебаниями) равна 318,02 см² (57,8 %). Частная дисперсия прилива без долгопериодных компонент была определена также для контроля по ее значению по квазиприливному компоненту, полученному с помощью обратного фильтра низких частот. Это значение равнялось 114,88 см², а полученное по формуле (1), из результатов гармонического анализа (99 волн) составило 114,63 см². Схождение практически полное.

В среднем общие приливные колебания уровня преобладают в суммарных колебаниях уровня моря. На самом деле уровни дисперсии существенно варьируют в летний и зимний периоды. В свою очередь в частной дисперсии приливных колебаний уровня доминируют полусуточные приливы, составляющие 95,0 % дисперсии короткопериодных приливов (без дисперсии долгопериодных колебаний).

Дисперсия приливов высших классов (от 1/3-суточных до 1/8-суточных) составляет 2,24 см² (1,95 % частной дисперсии прилива). Однако их также необходимо учитывать при точном прогнозе прилива. Эти волны позволяют точно представлять кривую прилива вблизи полных и малых вод, как в летний, так и в зимний периоды.

Распространение главных приливных волн M_2 и K_1. Распространение приливной волны M_2 в летний (август) и зимний (апрель) периоды

Летний период (август). Значительную роль в режиме колебаний уровня в Обской губе играют приливы, которые определяются в основном волнами полусуточного и, в меньшей степени, суточного периодов. В обобщающей работе по приливам в Обской губе был установлен их повсеместный полусуточный характер в летний (навигационный) период [12]. Поэтому основные черты распространения и формирования приливов можно установить по главной полусуточной волне M_2.

В работах по изучению приливов в Обской губе [8, 12] не было обнаружено каких-либо особенностей в виде узловых линий и особых точек в карте прилива M_2, поэтому был применен простой прием геометрической интерполяции для построения новых карт приливов. При построении карт плохо обеспеченным данными по уровню остался район входа в Тазовскую губу, но здесь имелись наблюдения за течениями, которые косвенно использовались для проведения изолиний амплитуд и фаз.

В Тазовской губе между Антипаютой и р. Хорлянкой также имелся пробел в наблюдениях, который был восстановлен с помощью интерполяции.

По данным карты видно (рис. 3), что наибольшая амплитуда волны M_2 наблюдается у западного (Ямальского) берега в районе о. Халэвнго и к югу от него. Здесь она достигает 54 см в районе р. Песчанка. Причиной такого усиления является перераспределение энергии приливной волны Карского моря при выходе на мелководье северного участка Обской губы. При этом амплитуда на правом берегу относительно распространения волны M_2 на входе Обской губы в 2,8 раза больше таковой на левом берегу (на створе изолинии 270°: западный берег — о. Шокальский). Этот эффект объясняется главным образом влиянием силы Кориолиса, но только отчасти, так как на северном участке в районе о. Шокальского происходит начальная фаза формирования узловой зоны, то есть в этом районе возрастает доля стоячего колебания при преобладании в целом прогрессивного характера волны.

Разность уровней прилива волны M_2 на концах створа составляет около 25 см, а теоретическая разность (наклон уровня) за счет отклоняющей силы вращения Земли на широте 72,83° и ширине пролива 51,8 км при средней сизигийной скорости приливного течения 50 см/с в летний период равна почти 37 см.

Расчет наклона уровня выполнен по формуле Н.Н. Зубова:

$$\Delta h = 2\omega V b \sin\varphi / g, \qquad (2)$$

где ω — угловая скорость вращения Земли; V — максимальная скорость приливного течения; b — ширина канала; φ — географическая широта; g — ускорение силы тяжести.

Наблюдаемая разность амплитуд волны M_2 между берегами залива (правым и левым относительно движения приливной волны) меньше теоретической на 12 см. Это объясняется влиянием узловой зоны у о. Шокальского.

Превышение амплитуд прилива на западном берегу над восточным берегом прослеживается вдоль всего эстуария Обской губы (см. рис. 3). На среднем (м. Тамбей — м. Каменный) и южном (м. Каменный — р. Шуга) участках приливная волна имеет в основном поступательный вид с постепенным уменьшением амплитуды волны до 5 см в районе р. Шуга. Отсюда следует, что несмотря на заметное уменьшение глубин вверх по губе и живого сечения преобладает диссипация приливной энергии под влиянием донного трения.

На профиле мгновенной поверхности (высоты) суммарного прилива на август, представленной на рис. 4, видно, что в Обской губе наблюдаются одновременно три полных воды. Первая задана на входном створе на изолинии 270°, вторая полная вода в такой же момент времени наблюдается у м. Яптик-Сале и третья полная вода видна у о-ов Варнинских (вблизи Ям-Сале). Это свидетельствует, что в Обской губе в каждый момент времени присутствуют две приливные волны с уменьшением высоты полной воды к вершине в пропорции 1 : 3,5 : 5,7. Приливная волна пробегает Обскую губу до р. Шуга за 27,4 ч (табл. 5).

Скорость движения волны M_2 значительно варьирует на разных участках Обской губы, что отражает изменение соотношения между падающей и отраженной волнами, приводящее также к изменению поступательной и стоячей долей колебания в волне прилива.

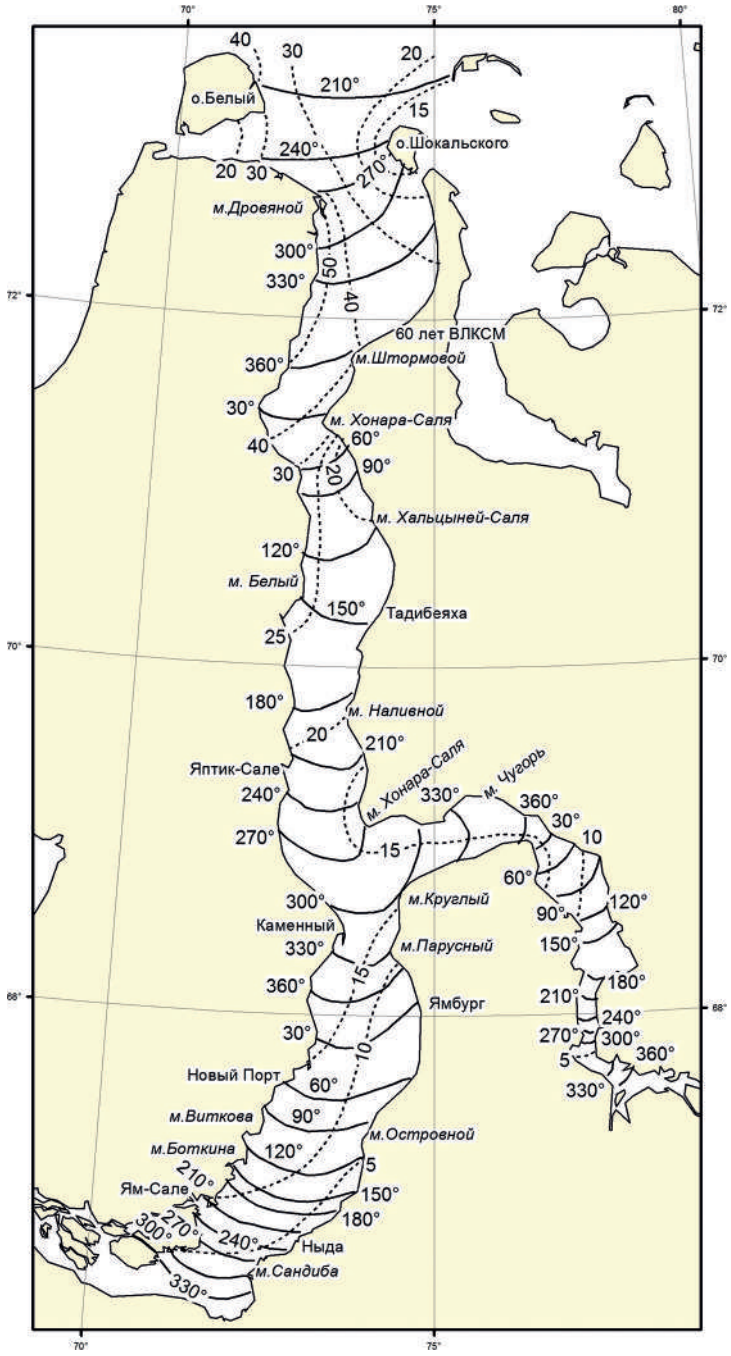


Рис. 3. Изоамплитуды (в см, пунктирная линия) и изофазы (в град, сплошная линия) волны M_2 для августа (летний период)

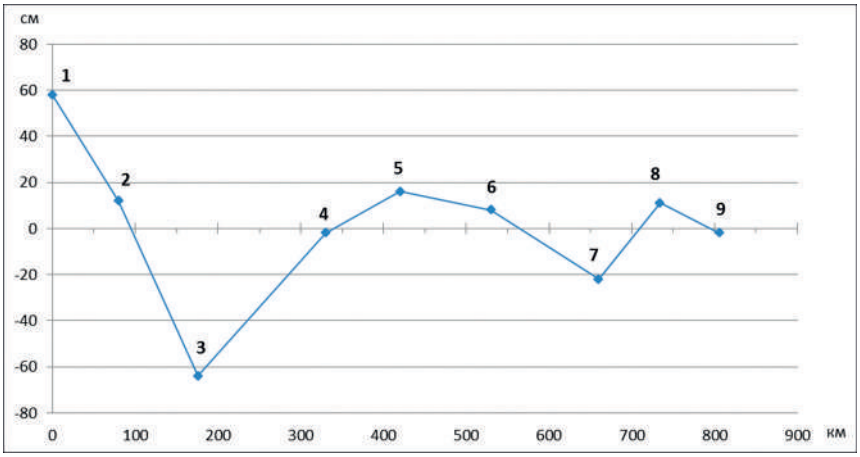


Рис. 4. Мгновенный профиль высоты прилива (сумма всех волн), рассчитанный на 23 ч 23 августа 2028 г. в пунктах Обской губы: *1* — Дровяной, *2* — Песчанка, *3* — Тамбей, *4* — Сеяха, *5* — Яптик-Сале, *6* — Каменный, *7* — Новый Порт, *8* — Ям-Сале, *9* — Надым. По горизонтальной оси расстояние в км от м. Дровяного

Таблица 5

Время и скорость распространения волны M_2 на разных участках Обской губы в летний период (август)

Участок (пункт)	Расстояние от начала, км (S)	Изменение фазы от начала, град	Время движения, до пункта, ч (t)	Скорость волны между пунктами, км/ч ($\Delta S/\Delta t$)
Изолиния 270°	0	0	–	–
р. Песчанка	80	62	2,1	37,4
м. Тамбей	176	118	4,1	49,7
Сеяха	330	261	9,0	31,2
м. Яптик-Сале	420	342	11,8	32,2
м. Каменный	530	401	13,8	54,0
Новый Порт	660	521	18,0	31,4
м. Ям-Сале	734	666	23,0	14,8
о-ва Варнинские	773	722	24,9	20,2
р. Шуга	806	803	27,7	13,5

В табл. 5 представлены реальное время движения и скорость распространения волны M_2 на разных участках Обской губы для летнего периода (август). При расчете времени движения задавался период волны M_2, равный 12,4206 ч. Поэтому 1 град изменения фазы соответствует изменению времени 2,0701 мин. С целью соблюдения

однородности условий значения фазы в пунктах брались для западного берега. Расстояние снималось с карты по срединной линии Обской губы.

По данным табл. 5, была определена для Обской губы по всей длине средняя взвешенная скорость движения волны M_2 для августа месяца, которая равна 34,5 км/ч, или 9,6 м/с. Скорость прогрессивной волны в Обской губе по теории ($C = \sqrt{gH}$) при средней глубине 9,8 м [13] при $g = 9{,}826$ м/с (на средней широте 70°) составит 9,8 м/с. Отсюда следует, что в летний период (в августе) приливная волна волны M_2 распространяется в целом практически как поступательная волна.

На участках Песчанка – Тамбей и Яптик-Сале – Каменный скорость волны имеет максимальные значения и достигает 54 км/ч (15,0 м/с), а в южной части губы, на участке Варнинские – Шуга, скорость замедляется до 13,5 км/ч (3,8 м/с). При средней глубине северного участка 11,7 м и южного — 5,6 м скорость поступательной волны по теории будет равна на этих участках соответственно 10,7 и 7,4 м/с, то есть стоячая доля колебания более заметна в крайней южной части Обской губы и, как уже выше отмечалось, на акватории при входе в Обскую губу.

В Тазовской губе приливная волна M_2 в летний период также имеет преобладающий поступательный вид. В момент полной воды на створе по изолинии 270° на входе в губу следующая полная вода будет наблюдаться синхронно в Юрхарово. То есть в Тазовской губе размещается более чем одна приливная волна M_2. Амплитуда прилива M_2 постепенно уменьшается от 15 см у входа до 10 см на широте 69° и далее падает до 2 см у м. Нарсо-Мя-Сале (см. рис. 3). Средняя взвешенная по трем участкам скорость движения от меридиана 74° (место слияния Обской и Тазовской губ) до м. Нарсо-Мя-Сале равна 19,9 км/ч, или 5,5 м/с. По теории средняя скорость движения волны при средней глубине 4 м составит 6,3 м/с. Здесь мы видим некоторое расхождение между реальной и теоретической скоростью. По-видимому, это обусловлено ошибками приближенной оценки расчета в районе обширного мелководья с очень малыми глубинами в южной части Тазовской губы.

Зимний период (апрель). С установлением ледяного покрова в Обской губе и ростом толщины льда происходит изменение характеристик прилива. Наблюдается сезонная изменчивость амплитуд и фаз основных полусуточных M_2, S_2, N_2 и суточных K_1, O_1 волн прилива. Максимальные изменения прилива в сравнении с августом наблюдаются в апреле. Поэтому основные черты распространения и формирования приливной волны в зимний период можно проследить по картам изоамплитуд и изофаз волны M_2 в апреле (рис. 5, котидальная карта).

По сравнению с летней картой (см. рис. 3) произошли большие изменения в величине амплитуд прилива M_2 в сторону сильного уменьшения на входе в губу (почти в 2 раза) и все более растущего уменьшения по мере продвижения волны на юг. Схема изолиний имеет поступательный вид. По сравнению с летней схемой происходит увеличение (запаздывание) фаз примерно от 50° на входе до 120° в районе м. Виткова. К югу от этого мыса прилив практически исчезает (амплитуда M_2 меньше 1 см).

По всей длине Обской губы, как и в летний период, в апреле укладываются две приливных волны. В один и тот же момент времени при полной воде на входе (по изолинии 300°) вторая полная вода будет наблюдаться к югу от м. Харсё и третья полная вода — примерно где-то к югу от м. Виткова.

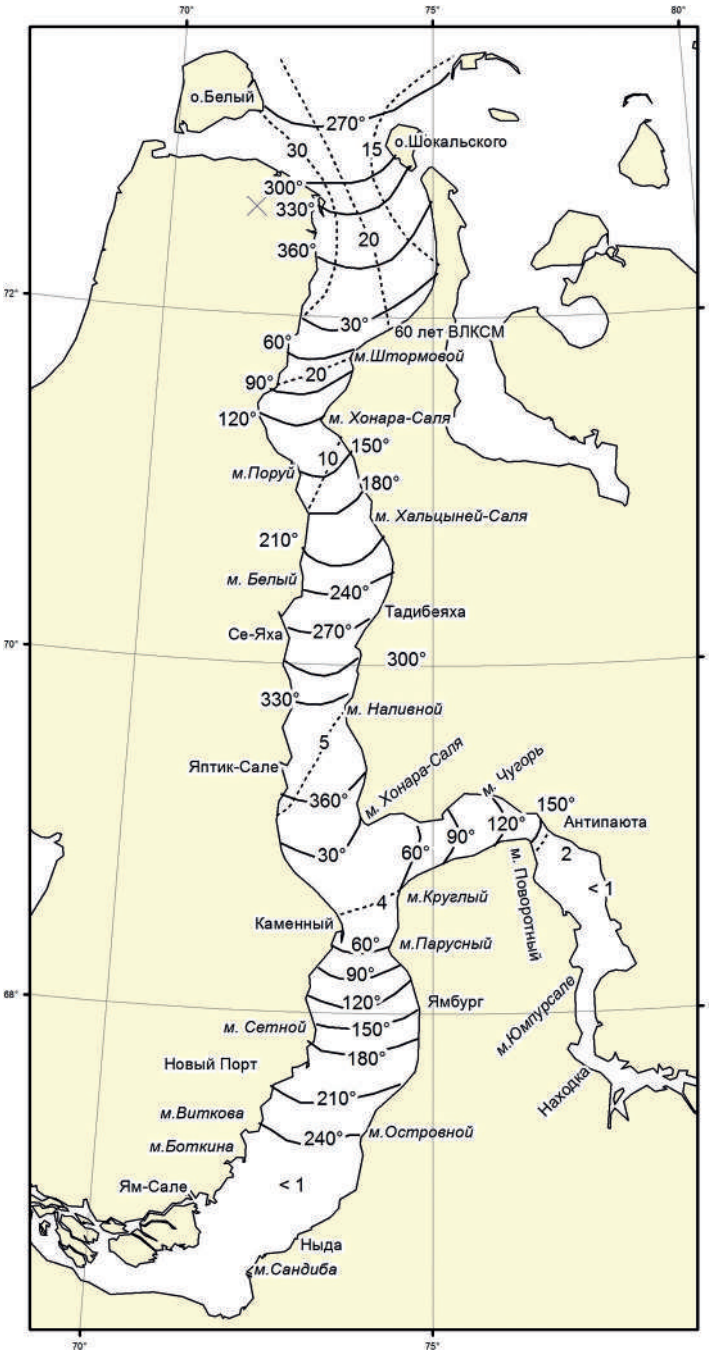


Рис. 5. Изоамплитуды (в см, пунктирная линия) и изофазы (в град, сплошная линия) волны M_2 для апреля (зимний период)

В Тазовской губе происходит еще большее гашение прилива. На среднем участке этой губы за м. Поворотный прилив M_2 резко уменьшается до 2 см и практически пропадает далее к югу (амплитуда меньше 1 см).

В табл. 6 даны реальное время движения и скорость распространения волны M_2 на разных участках Обской губы для зимнего периода (апрель). Для сопоставимости с табл. 5 по длине участков к начальному отсчету фазы добавлена постоянная поправка в 30° (разность между начальной летней и зимней изолиниями). Эта же поправка в единицах времени (1,035 ч) добавлена к значениям времени движения.

Таблица 6

Время и скорость распространения волны M_2 на разных участках Обской губы в зимний период (апрель)

Участок (пункт)	Расстояние от начала, км (S)	Изменение фазы от начала, град	Время движения, до пункта, ч (t)	Скорость волны между пунктами, км/ч ($\Delta S/\Delta t$)
Изолиния 300°	0	0(30)*	0(1,0)	–
м. Тамбей	176	154 (184)	5,3+1=6,3	33,1
Сеяха	330	345 (375)	11,9+1=12,9	23,4
м. Яптик-Сале	420	402 (432)	13,9+1=14,9	45,7
м. Каменный	530	464 (494)	16,0+1=17,0	51,4
Новый Порт	660	625 (655)	21,6+1=22,6	23,4
б. Находка	695	671 (701)	23,1+1=24,1	22,0

Примечание. *–30° разность фаз на начальном створе между августом и апрелем. В единицах времени около 1 ч.

По данным табл. 6 была определена для Обской губы до Находки средняя взвешенная скорость движения волны M_2 для апреля месяца, которая равна 33,1 км/ч, или 9,2 м/с. Поскольку в зимний период приливная волна движется под ледяным покровом, то глубину следует брать подо льдом. В отсутствие полной информации о средней толщине льда в апреле для Обской губы в целом будем опираться на экспертную оценку. По нашей оценке, средняя толщина льда в апреле (конец месяца) достигает 154 см (средняя величина из средних многолетних значений для 5-ти п/ст). При учете плавучести льда примем толщину плавающего льда в 139 см. Тогда средняя глубина моря подо льдом составит 8,4 м. Скорость прогрессивной волны в Обской губе по теории при средней глубине 8,4 м при $g = 9{,}826$ м/с составит 9,1 м/с. Отсюда следует, что в зимний период (в апреле) приливная волна волны M_2 распространяется в целом как поступательная волна. Получается, что в зимний период скорость волны ближе к теоретической скорости, чем в летний период. Это, по-видимому, может быть приписано эффекту отражения от кромки припайного льда на входе в Обскую губу и отражению при движении волны от припая, жестко связанного с берегом (подошвы припая).

По сравнению с летним периодом скорость движения волны в среднем уменьшилась всего на 0,4 м/с или на 4,2 %. Это снижение скорости произошло в основном за счет действия трения под льдом. Но часть общей диссипации приливной энергии в зимний период, которую трудно оценить и которую в арктических морях не учитывают современные численные модели, уходит на формирование приливных трещин и процессы торошения льда в них.

При сравнении времени движения приливной волны на чистой воде и подо льдом по данным табл. 5 и 6 видно, что зимой на северном участке губы в районе Тамбея волна приходит позже, чем летом на 2,2 ч, и сдвиг времени (запаздывание) достигает 4,6 ч в районе Нового порта.

Распространение приливной волны K_1 в летний (август) и зимний (апрель) периоды

Летний период (август). Результаты гармонического анализа показали, что для полной характеристики распространения и формирования приливов в Обской губе необходимо знать поведение основных суточных волн K_1 и O_1. В особенности это относится к приливу K_1, амплитуда которого более чем в 2 раза превышает таковую у прилива O_1. Карты этих приливов ранее [Коптева, 1953] не были получены, вследствие большого количества ошибок в обработке и недостатка в наблюдениях.

По данным карты изоамплитуд и изофаз прилива K_1 (рис. 6) видно, что приливная волна не имеет особых точек и распространяется как поступательная. На акватории Обской губы укладывается одна приливная волна. В момент времени, когда на входе у м. Дровяной наблюдается полная вода этого прилива, в этот же момент времени вторая полная вода будет отмечаться у м. Ям-Сале. При этом заметно сильное увеличение амплитуды на западном берегу, что, как и для прилива M_2, связано с влиянием силы Кориолиса. Наиболее выражен этот эффект на северном участке Обской губы, где амплитуда прилива волны K_1 на западном берегу достигает 8 см. При продвижении волны K_1 на юг различие амплитуд на западном и восточном берегах становится мало заметным. Но и величина амплитуды прилива к югу плавно уменьшается до 1 см за м. Ям-Сале.

В Тазовской губе в районе слияния с Обской губой амплитуда волны K_1 равна 3 см и падает до значений менее 1 см к югу от м. Поворотный.

Произведем оценку скорости движения волны K_1. При этом, как и ранее, будем опираться на данные наблюдений на западном берегу, наиболее обеспеченному наблюдениями.

В табл. 7 даны реальное время движения и скорость распространения волны K_1 на разных участках Обской губы для летнего периода (август). Начало участка на изолинии 240° волны K_1 расходится на 10 км с изолинией 270° для волны M_2 (см. табл. 5). При расчете времени движения задавался период волны K_1, равный 23,9345 ч. Поэтому 1 град изменения фазы соответствует изменению времени 3,9891 мин.

По данным табл. 7 была определена для Обской губы по всей длине средняя взвешенная скорость движения волны K_1 для августа месяца, которая равна

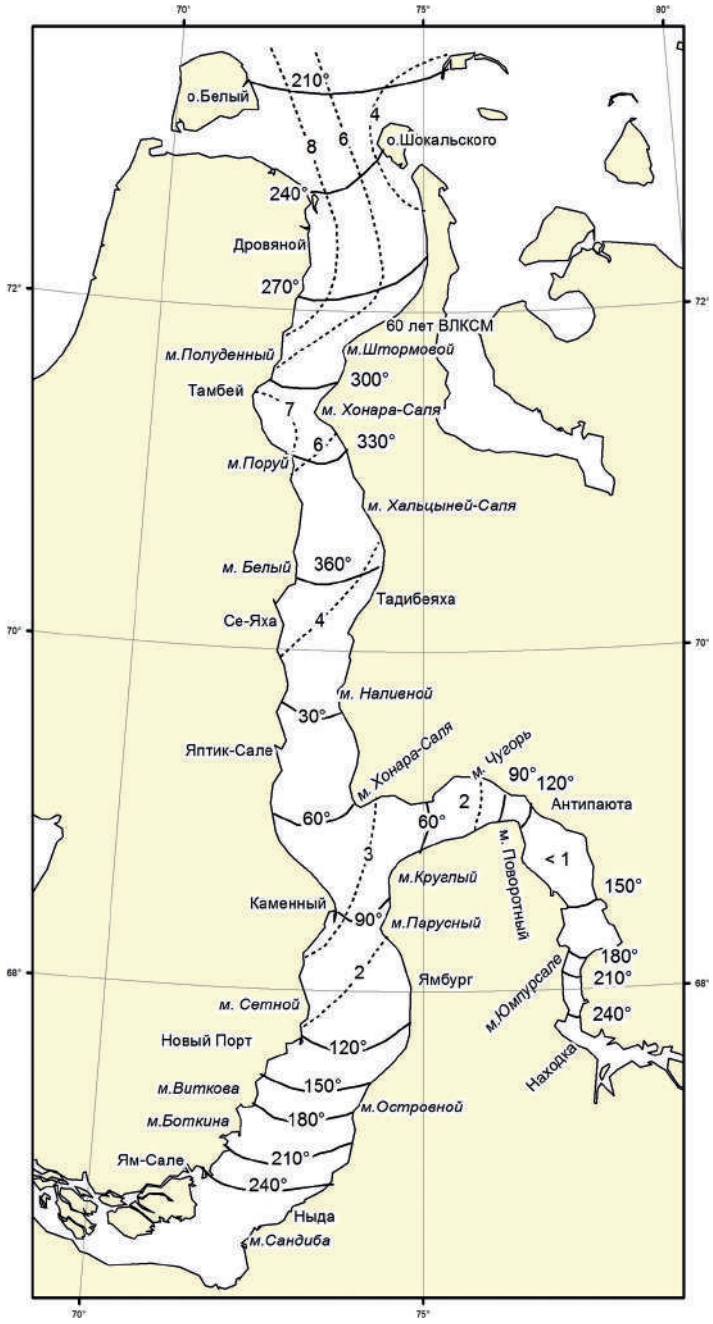


Рис. 6. Изоамплитуды (в см, пунктирная линия) и изофазы (в град, сплошная линия) волны K_1 для августа (летний период)

35,6 км/ч, или 9,9 м/с. Выше скорость прогрессивной волны в Обской губе на чистой воде, по теории, была определена значением 9,8 м/с. Близость (в пределах ошибок расчета) реальной и теоретической скоростей показывает, что в летний период (в августе) приливная волна волны K_1 распространяется в целом практически как поступательная волна. Диссипация энергии волны K_1 за счет донного трения пренебрежимо мала.

Зимний период (апрель). Распространение и формирование прилива волны K_1 в зимний период представлено на схеме изолиний амплитуд и фаз (рис. 7). Вследствие малости значений амплитуд этого прилива на большей части акватории и малой надежности оценок при их величине менее 1 см, не удалось построить схему ниже места слияния Обской и Тазовской губ.

Таблица 7

Время и скорость распространения волны K_1 на разных участках Обской губы в летний период (август)

Участок (пункт)	Расстояние от начала, км (S)	Изменение фазы от начала, град	Время движения, до пункта, ч (t)	Скорость волны между пунктами, км/ч ($\Delta S/\Delta t$)
Изолиния 240°	0	0	–	–
Р. Песчанка	70	24	1,6	43,8
м. Тамбей	166	68	4,5	33,8
Сеяха	320	126	8,4	39,9
м. Яптик-Сале	410	158*	10,5	42,3
м. Каменный	520	204	13,6	35,9
Новый Порт	650	256	17,0	37,6
м. Ям-Сале	724	363	24,1	10,4

Примечание. *–Значение исправлено по карте, фаза по наблюдениям в Яптик-Сале завышена.

В северной части губы уменьшение амплитуды прилива K_1 по сравнению с летним периодом не так заметно. На западном берегу залива у м. Дровяной амплитуда составляет около 7 см. Наблюдается сдвиг фазы (запаздывание) относительно летнего периода на 30°, но при этом запаздывание фазы практически отсутствует в районе м. Тамбей. По-видимому, это объясняется влиянием сужения сечения залива и изменением условий отражения волны. На среднем участке Обской губы до м. Каменный амплитуда прилива постепенно падает до 1 см.

Оценим время движения и скорость распространения волны K_1 в зимний период на северном и среднем участках залива. За начало возьмем изолинию 264° (см. рис. 6) для сопоставимости с расчетами табл. 7. Также к изменению фазы добавлена поправка за изменение фазы на начало отсчета между августом и апрелем, равная 24°, или 1,6 ч. Эта поправка времени вводится ко всем участкам табл. 8.

Рис. 7. Изоамплитуды (в см, пунктирная линия) и изофазы (в град, сплошная линия) волны K_1 для апреля (зимний период)

По данным табл. 8 для Обской губы была определена средняя взвешенная скорость движения волны K_1 для апреля месяца, которая равна 29,3 км/ч, или 8,1 м/с. Выше скорость прогрессивной волны в Обской губе в апреле, по теории, была определена значением 9,1 м/с. Скорость волны K_1 уменьшается зимой на 11 %, в то время как у волны M_2 составила только 4,2 %. По-видимому, различие связано с тем, что скорость движения волны K_1 зимой определена на северном и среднем участках Обской губы и не является полной оценкой для всего залива. Южный участок губы ниже м. Каменного не вошел в расчет вследствие недостатка надежных данных. К тому же сами расчеты менее надежны, чем для волны M_2.

Таблица 8

Время и скорость распространения волны K_1 на разных участках Обской губы в зимний период (апрель)

Участок (пункт)	Расстояние от начала, км (S)	Изменение фазы от начала, град	Время движения, до пункта, ч (t)	Скорость волны между пунктами, км/ч ($\Delta S/\Delta t$)
Изолиния 264°	0	0(24*)	(1,6*)	–
м. Тамбей	166	47 (71)	3,1 + 1,6 = 4,7	30,7
Сеяха	320	130 (154)	8,6 + 1,6 = 10,2	27,9
м. Яптик-Сале	410	161 (185)	10,7 + 1,6 = 12,3	43,7
м. Каменный	520	206 (230)	13,7 + 1,6 = 15,3	36,7

Примечание. *–24° разность фаз на начальном створе между августом и апрелем. В единицах времени составляет около 1,6 ч.

В целом подтверждаются теоретические выводы Ю.М. Крылова [14] и гипотеза И.В. Максимова [15] о связи периода волны со скоростью ее распространения при движении волны под ледяным покровом. Волны с большим периодом гасятся в меньшей степени, чем волны с меньшим периодом.

Следствием этого является изменение характера прилива и других параметров прилива, которые будут рассмотрены ниже.

Из данных табл. 7 и 8 видно, что запаздывание прилива K_1 в апреле происходит намного в меньшей степени, чем для прилива волны M_2. В районе м. Каменный суточный прилив K_1 в апреле приходит позже на 1,7 ч по сравнению с августом. Полусуточный прилив M_2 в апреле здесь наступает со сдвигом в 3,2 ч (см. табл. 5 и 6).

Общая характеристика приливов.
Средняя сизигийная величина прилива в летний период (в августе)

Значения этой характеристики были определены по известным формулам Гарриса, а схема изолиний дана на рис. 8. В определенной степени характер изменения сизигийных амплитуд на акватории Обской и Тазовской губ подобен таковому у прилива волны M_2. Также максимальные величины наблюдаются на западном берегу северного участка Обской губы и в районе р. Песчанки достигают 151 см. На среднем и южном участках величина прилива постепенно уменьшается, соответственно, от 60–80 см до 10–15 см в вершине Обской губы в районе р. Шуга.

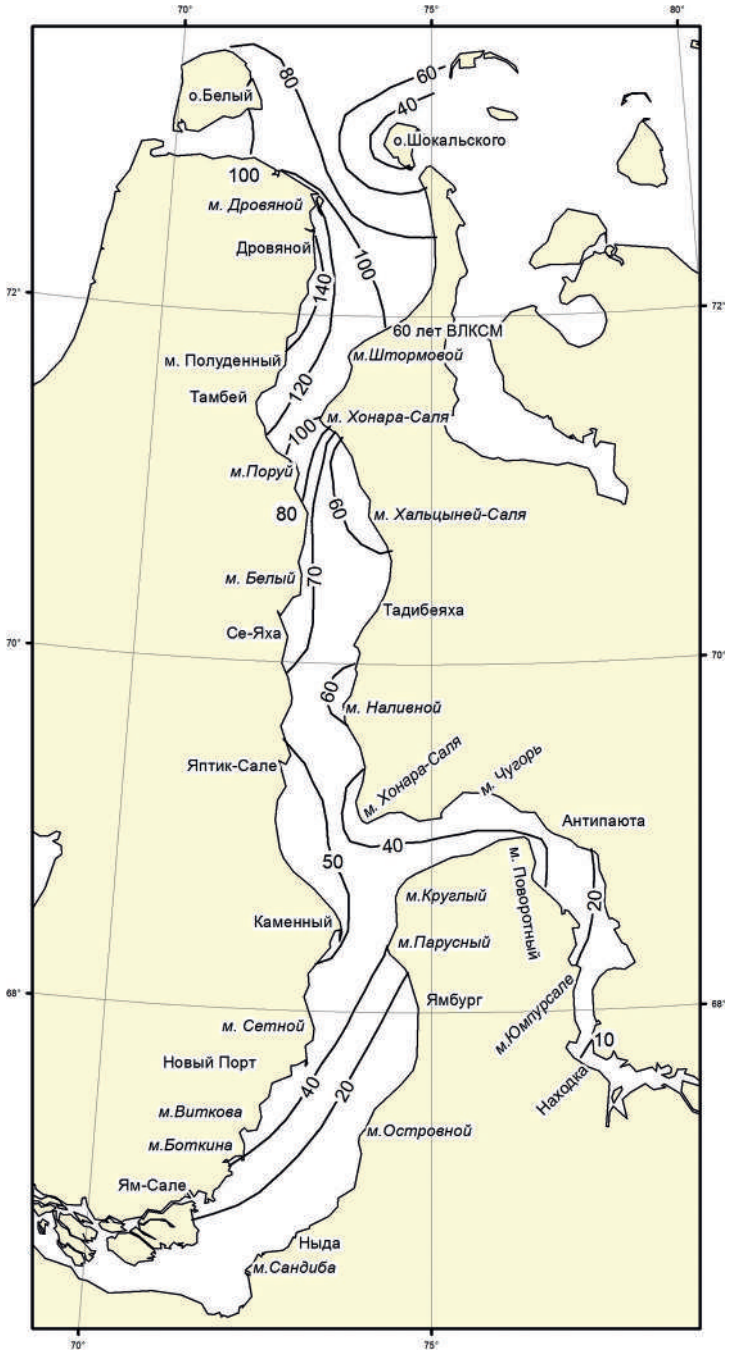


Рис. 8. Сизигийная величина прилива для летнего периода (август), в см

В Тазовской губе значения сизигийной величины прилива составляют около 40 см в месте слияния и постепенно уменьшаются к вершине губы, где не превышают 5 см у м. Нарсо-Мя-Сале.

В целом в качественном отношении наша карта близка к соответствующей карте А.В. Коптевой [12]. Но в количественном отношении имеются существенные различия, в особенности на северном участке, который представлен на новой карте более детально на основании новых данных (табл. 3).

Значительные расхождения видны в районе о. Шокальский, где у Коптевой нет заметного уменьшения значений прилива. Можно констатировать, что во многих акваториях Обской губы у Коптевой приведены завышенные значения величин прилива. Это произошло вследствие недостатка информации и использования в расчете прилива данных о приливных течениях, полученных из суточных и полусуточных циклов измерений.

Средняя сизигийная величина прилива в зимний период (в апреле)

Схема изолиний величины прилива в сизигию дана на рис. 9. На северном участке Обской губы наибольшие значения этой величины достигают 100 см в районе м. Дровяного. На среднем участке происходит резкое уменьшение величины прилива до 10–20 см. На южном участке сразу за мысом Каменный наблюдается дальнейшее уменьшение этой величины до 5 см. По-видимому, в районе мыса Ям-Сале в зимний период прилив полностью пропадает даже в сизигию.

По сравнению с аналогичной характеристикой для летнего периода, как и следовало ожидать из предыдущих оценок карт приливов волн M_2 и K_1, видно сильное уменьшение значений, резко возрастающее в направлении распространения приливной волны. Если на северном участке уменьшение составляет около 1,4 раза, то в средней части губы — уже в 3,8 раза, а в южной части в районе Нового порта — почти в 6 раз.

В Тазовской губе величина прилива в сизигию в зимний период в месте слияния с Обской губой составляет 5–10 см. К югу от мыса поворотный прилив уже не превышает 5 см и где-то выше р. Хорлянки даже в сизигию полностью исчезает.

Выводы

Получены новые оценки гармонических постоянных волн приливов по всем постоянным и временным постам наблюдений за уровнем моря. Для постоянных пунктов в Обской и Тазовской губах (Нгарка, Тамбей, Тадибеяха, Сеяха, Каменный, Новый Порт, Ямбург, Антипаюта) с многолетними регулярными наблюдениями рассчитаны оценки сезонной и межгодовой изменчивости констант основных волн приливов, также получены оценки долгопериодных приливов. Применялась новая версия гармонического анализа приливов с описанием сезонной изменчивости основных и мелководных волн. Проведена ревизия по новой методологии всех доступных исторических материалов наблюдений за уровнем моря. При этом была выполнена оценка качества материалов наблюдений и произведена их коррекция, и временные ряды в базах данных уровня приведены к однородным рядам. Без этой процедуры производство гармонического анализа приливов может дать совершенно нереальные результаты.

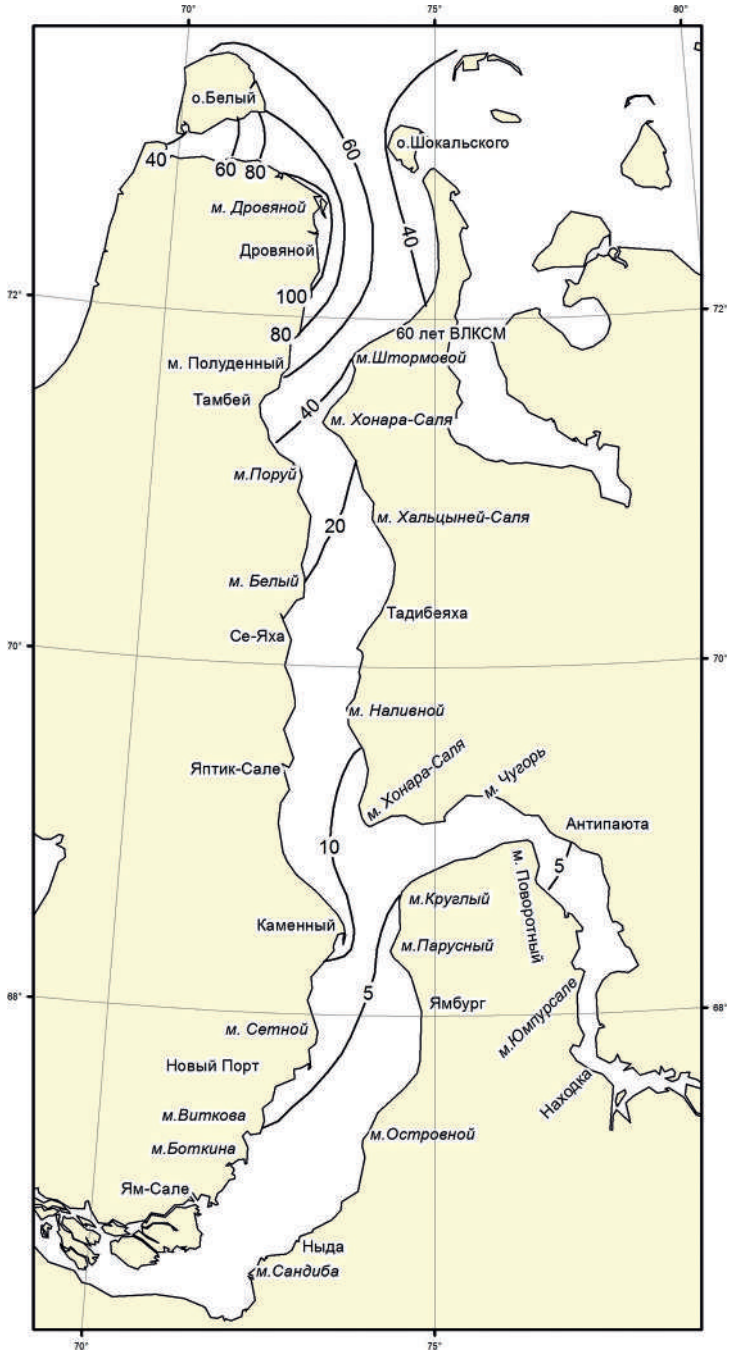


Рис. 9. Сизигийная величина прилива для зимнего периода (апрель), в см

Построены новые приливные карты изоамплитуд и изофаз волн M_2 и K_1 и новые карты величин среднего сизигийного прилива для летнего (август) и зимнего (апрель) периодов в Обской и Тазовской губах.

Литература

1. *Войнов Г.Н.* Приливные явления в Карском море. — СПб.: Изд-во Русского геогр. общ-ва, 1999. — 109 с.
2. *Войнов Г.Н.* Приливные явления и методология их исследований в шельфовой зоне арктических морей (на примере Карского и северо-восточной части Баренцева морей): автореф. дис. ... д-ра. геогр. наук. — СПб.: РГГМУ, 2003. — 45 с.
3. *Войнов Г.Н.* О сезонной изменчивости гармонических постоянных 1/4-суточных и 1/6-суточных волн приливов в Баренцевом и Белом морях // Метеорология и гидрология. 2007. № 4. — С. 55–68.
4. *Войнов Г.Н.* Методика контроля и редакции многолетних временных рядов уровня моря // Пробл. Арктики и Антарктики. 2011. № 4. — С. 51–61.
5. *Войнов Г.Н.* Способ приведения ежечасных наблюдений за уровнем моря к однородным рядам с помощью калибровки приливов // Пробл. Арктики и Антарктики. 2015. № 2(104). — С. 68–80.
6. *Войнов Г.Н., Пискун А.А.* Оценка приливов в Новом Порту (Обская губа) по наблюдениям за уровнем за период 1977–2012 гг. // Пробл. Арктики и Антарктики. 2015. № 3(105). — С. 51–65.
7. *Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения. — М.: Мир, 1971. Вып. 1. — 316 с.; Вып. 2. 1972. — 288 с.
8. *Диесперова Р.А.* Приливы Северного Ледовитого океана // Труды ГОИН. 1954. Вып. 19. — 74 с.
9. *Колюбакин Б.В.* Данные о приливах в Обской губе и у о-ва Белого // Зап. по гидрографии. 1933. № 1. — С. 34–42.
10. *Комчатов В.Ф., Лучков В.П.* Вековая морская гидрометеорологическая сеть-основа изучения гидрологического режима шельфовой зоны морей РФ и обеспечения гидрометеорологической безопасности // Тр. ГОИН. 2011. Вып. 213. — С. 5–14.
11. *Коптева А.В., Бутенко А.К., Иванова З.К.* Материалы по изучению приливов арктических морей СССР // Тр. Арктич. ин-та. 1952. Т. 42. Вып. VII. Карское море. — 536 с.
12. *Коптева А.В.* Уровень и течения Обской губы // Тр. Арктич. ин-та. 1953. Т. 59. — С. 84–148.
13. *Корт В.Г.* К вопросу о колебаниях уровенной поверхности Обской губы // Тр. ААНИИ. 1949. Т. 13. — С. 100–118.
14. *Крылов Ю.М.* Распространение длинных волн под ледяным полем // Тр. ГОИН. 1948. Вып. 8(20). — С. 107–111.
15. *Максимов И.В.* О зависимости элементов прилива от ледяного покрова моря // Учен. зап. Высш. аркт. морского уч. им. С.О. Макарова. 1953. Вып. IV. — С. 115–129.
16. *Носков А.П.* Приливы в Обь-Енисейском районе и шхерах Минина // Приливы в морях Советской Арктики. Мат-лы по гидрогр. морей и рек Сов. Арктики. Вып. III. — Л.: Изд-во Главсевморпути, 1938. — 63 с.
17. *Пискун А.А.* Состояние высотной основы и качество данных по уровням воды в Обско-Тазовской устьевой области // Пробл. Арктики и Антарктики. 2010. № 3(86). — С. 97–113.
18. *Стахевич В.С.* Данные о приливах в устьях рек Енисея и Оби // Зап. по гидрографии. 1926. Т. 51. — С. 95–102.
19. *Таблицы* приливов. Т. II. Гармонические постоянные для предвычисления приливов. — Л.: Изд-во Гидрогр. упр. ВМФ СССР, 1941. — 295 с.
20. *Pugh D.T.* Tides, surges and mean sea-level. A handbook for engineers and scientists. — New York, J. Willey, 1987. — 472 p.

С.М. Гордеева, А.Д. Жарова

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА РЫБОПРОМЫСЛОВОЙ ОБСТАНОВКИ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

S.M. Gordeeva, A.D. Zharova

OPERATIONAL ASSESSMENT OF FISHERIES IN THE SOUTHEAST PACIFIC

На основе спутниковых альтиметрических данных и данных о температуре поверхности океана сделана попытка выявить зоны биологической продуктивности вод юго-восточной части Тихого океана, где могут ожидаться промысловые скопления ставриды. Сопоставление с известными промысловыми зонами показало хорошее совпадение. Выявленные районы сопряжены с южным субтропическим фронтом и в основном определяются градиентами температуры поверхности океана.

Ключевые слова: спутниковые данные, юго-восточная часть Тихого океана, рыбопромысловый прогноз.

On the basis of satellite altimetry data and data of sea surface temperature an attempt has been made to identify the areas of biological productivity in the Southeast Pacific area, where commercial concentrations of horse mackerel Trachurus murphyi can be expected. The comparison of the results to the known fishing areas in the Southeast Pacific showed good agreement. The identified areas are connected with the Southern Subtropical Front and are mainly driven by the sea surface temperature gradient.

Keywords: satellite data, Southeast Pacific, fishing forecast.

Введение

Промысловый район юго-восточной части Тихого океана (ЮВТО) еще с конца семидесятых годов прошлого века стал важным промысловым районом для Советского Союза благодаря своей высокой биологической продуктивности, которая обусловлена уникальными физико-географическими условиями в данной части Тихого океана. Однако с распадом Советского Союза и ухудшением экономической ситуации в стране в 1991 г. промысел в данном районе прекратился [3]. Тем не менее интерес к данному региону со стороны России сохраняется. В начале и в конце прошлого десятилетия Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (АтлантНИРО) провел две экспедиции в ЮВТО, подтвердившие сохранение биологической продуктивности данного промыслового района [8].

В настоящее время наиболее актуальным подходом к прогнозированию промысловых скоплений рыбы можно считать использование спутниковых данных, поскольку это значительно упрощает рыбопромысловую разведку. По данной тематике известно несколько работ, например работа [5], в которой рассматривается применение спутниковых альтиметрических снимков для оценки промыслово-океанологической

обстановки в ЮВТО. В данной работе рассчитывались аномалии уровенной поверхности, получено поле синоптической динамической топографии, сопоставление которого с результатами контрольных тралений показало наибольшую концентрацию рыбных скоплений в районе динамических неоднородностей поверхности океана (меандры, вихри).

Еще одной работой по этой тематике является работа Мышерина [4], в которой описан алгоритм применения спутниковой информации для определения рыбопродуктивных зон Мирового океана. За основу работы взят известный факт о приуроченности промысловых скоплений рыб к термическим фронтам, а также учтены такие факторы, как кормовая база для рыбы и динамическая топография. Исходными данными в этой работе являлись температура поверхности океана (ТПО), уровенная поверхность океана, их градиенты и распределение хлорофилла.

В настоящей работе рассматривается метод прогнозирования, основанный на использовании спутниковых данных о температуре поверхности и уровне океана.

Исходные данные и методы исследования

За основу работы взят патент № 2495566 «Способ мониторинга и прогноза скоплений пелагических рыб-планктонофагов» [6]. Суть метода состоит в определении зон пересечения областей повышенных градиентов ТПО (по исходному методу — более 0,1 °С на милю) с областями отклонений уровня от усредненной поверхности акватории (не более ±5 см) с нанесением этих областей на промысловые планшеты. В местах пересечения указанных характеристик ожидаются скопления рыб. В патенте предполагается использование информации о распределении ТПО из всевозможных источников, в том числе и спутниковых. Информация об отклонениях уровня — спутниковые альтиметрические данные. Дискретность по пространству не должна превышать 20 миль. Разработанные промысловые планшеты передаются рыболовецким судам, руководителям флотилий и судовладельцам. На основании этих планшетов капитаны судов могут выбирать районы акватории, наиболее перспективные в промысловом отношении.

В настоящей работе изучается возможность применения методики патента [6] к оценке промысла ставриды в ЮВТО, рассматривается несколько модификаций данного метода. Во-первых, вместо аномалий уровенной поверхности используется динамическая топография (высота поверхности океана над геоидом, ВПО). Во-вторых, выдвигается гипотеза о скоплении ставриды в областях пересечения минимальных градиентов ВПО и повышенных градиентов ТПО. Данная гипотеза основана, в частности, на работе Д.А. Чурина [7], в которой изучалось распределение антарктического криля в областях мезомасштабных вихрей. Итогом его исследования явился вывод о наибольшем скоплении криля на периферии вихря, где выявляются небольшие аномалии уровенной поверхности (±5 см) и, соответственно, небольшой градиент ВПО.

Поясним более подробно ряд соображений, после которых была выдвинута гипотеза о скоплениях рыб в областях с небольшим градиентом уровня поверхности. В своей работе Д.А. Чурин [7] рассматривал криль, который хоть и может самостоятельно перемещаться, однако его размеры малы, и сопротивляться динамике вод он

не может. В связи с этим обнаружение больших скоплений криля на периферии вихря можно объяснить тем, что он как бы «скатывается по склону» вихря и накапливается в областях, где нет больших градиентов уровня.

Рацион ставриды составляют разнообразные планктонные беспозвоночные — ракообразные, сифонофоры, моллюски, щетинкочелюстные, а из позвоночных — рыбы, их икра и личинки [1]. Все из перечисленного, кроме рыб, также как и криль, могут «скатываться» в области с небольшим градиентом уровня и там накапливаться, а ставрида способна подходить к местам этих скоплений. Условие повышенного градиента ТПО не может быть исключено ввиду того, что ее повышенные градиенты указывают на фронтальные разделы, а, как известно, это зоны высокой биологической продуктивности за счет образования вихрей, вертикальных циркуляционных ячеек в зоне фронта, в которых происходит поднятие биогенных элементов.

Для исследования был выбран участок ЮВТО в следующих границах: от 20 до 50° ю.ш. и от 75 до 100° з.д.

Исходными данными для работы послужили суточные значения температуры и высоты поверхности океана. Источником информации о ВПО послужили данные глобальной модели реанализа Global Ocean Physics Reanalysis GLORYS2V3, которая построена на базе океанской модели NEMO и ассимилирует данные альтиметрии и буев ARGO (http://marine.copernicus.eu/web/69-interactive-catalogue.php?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_PHYS_001_009) [9]. Данные о ВПО в модели представлены в метрах. Пространственное разрешение — 0,25° по долготе и 0,2° по широте. Значения ТПО взяты из модели OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) с шагом по сетке в 1/4° (http://www.ncdc.noaa.gov/oisst) [10].

Период исследования — с 30 сентября 2002 г. по 31 января 2003 г. — совпадает по времени с экспедицией АтлантНИРО в регионе ЮВТО [8]. Из общего массива данных выбирались значения за каждый 5-й день, в итоге производилась обработка 25 пентадных полей ТПО и ВПО.

По исходным данным рассчитывались пространственные градиенты ВПО и ТПО по следующей формуле [3]:

$$\frac{\Delta N}{\Delta L} = \sqrt{\left(\frac{\Delta N}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N}{\Delta y}\right)^2},$$

где N — характеристика, градиент которой рассчитывается; x, y, L — расстояния в меридиональном, широтном и трансфронтальном направлениях, соответственно, в милях; ΔN — перепад характеристики по соответствующему направлению.

Результаты и обсуждение

Первоначально рассматривалось среднее распределение градиентов ТПО за исследуемый период. На рис. 1, *а* представлено среднее распределение градиентов ТПО в рассматриваемой области, а на рис. 1, *б* — среднее многолетнее положение Южного субтропического фронта и его квантильный анализ [3]. Как видно из рисунка, зоны повышенных градиентов ТПО приурочены к Южному субтропическому фронту.

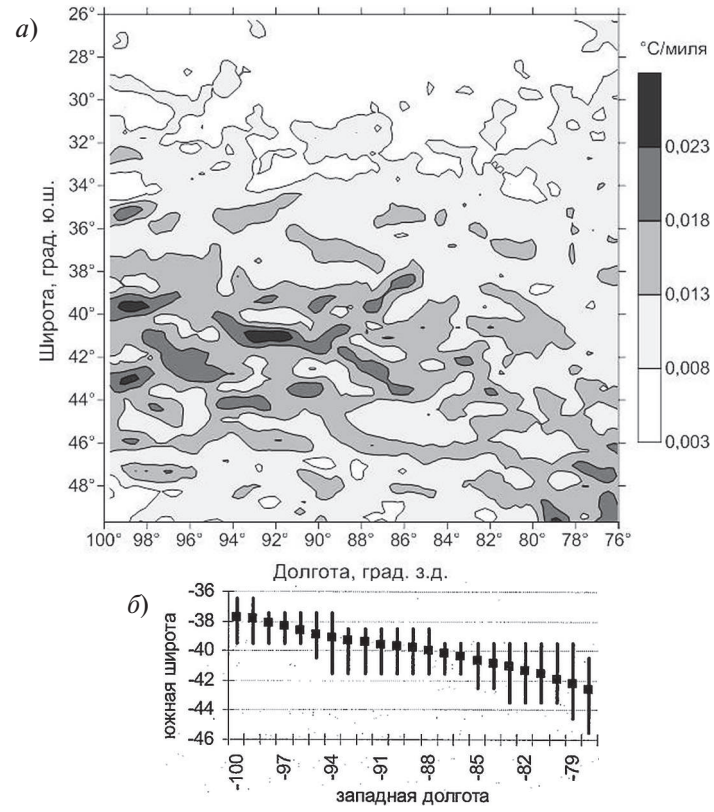


Рис. 1. Среднее за период с 30 сентября 2002 г. по 31 января 2003 г. распределение пространственного градиента ТПО (*а*) и среднемноголетнее положение и квантильный анализ Южного субтропического фронта (*б*) по [3]

В соответствии с методикой патента [6] для каждого пятого дня из общего объема данных строились промысловые планшеты — карты с областями пересечения распределений различных промысловых характеристик. Суть данных карт в том, что в областях пересечения двух характеристик, выделенных в определенном диапазоне значений, ожидаются скопления промысловых видов рыб, в частности перуанской ставриды.

Вариант промысловых планшетов № 1. На карты наносились области повышенных градиентов ТПО (более 0,02 °С/миля) и ВПО в пределах ±5 см. Пример данной карты приведен на рис. 2.

При визуальной оценке планшетов этого типа за весь период исследований можно выделить довольно много зон, где отмечается пересечение требуемых по методу характеристик. В целом такие зоны наблюдаются в полосе от 35 до 45° ю. ш. Отмечается смещение как зон повышенных градиентов ТПО, так и зон ВПО (в пределах ±5 см) на юг к середине лета южного полушария.

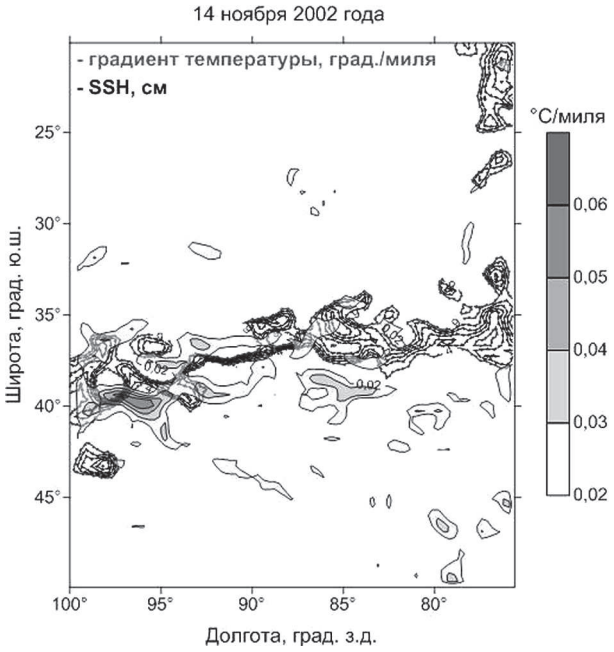


Рис. 2. Пример промыслового планшета на 14 ноября 2002 г. Черные линии — ВПО в пределах ±5 см; серая градиентная заливка — области повышенных градиентов ТПО, °С/миля

Для выявления области, где наиболее часто следует ожидать скоплений перуанской ставриды, в одноградусной сетке было рассчитано число совпадений следующих условий: градиент ТПО в пределах от 0,02 до 0,06 °С/миля и ВПО в пределах ±5 см. Результаты представлены в виде карты (рис. 3), на которой величина точек пропорциональна числу совпадений. Максимально возможная повторяемость равна 25 случаям.

При рассмотрении карты (см. рис. 3) выделяются три области. Две из них лежат в полосе 39–45° ю.ш., а по долготе располагаются от 80° и почти до 100° з.д. Третья, и самая маленькая из всех, смещена немного южнее: в район 42–47° ю.ш. и по долготе — между 75–79° з.д., в этой области наименьшее число повторений требуемых условий. Максимум повторений наблюдается в самой западной области и достигает 23 случаев из 25 (90–95° з.д.). В целом можно сказать, что область, где с наибольшей вероятностью ожидаются скопления рыб, лежит в пределах следующих координат: 40–45° ю.ш. и 85–100° з.д. Карта была сопоставлена с ареалом обитания ставриды [2] и выявлено, что выделенные на рис. 3 области попадают в этот ареал.

Также для оценки достоверности результатов использовались данные о выловах АтлантНИРО в 80-х гг. прошлого столетия из диплома И.Ю. Митина (РГГМУ, 2007). При рассмотрении пространственного распределения количества выловов четырехлетней и пятилетней перуанской ставриды в период с 1980 по 1991 г. выявлено, что наибольший вылов рыбы в целом приходится на район 35–45° ю.ш. и 80–105° з.д.,

а максимум — на квадрат с координатами 40–45° ю.ш. и 80–90° з.д. Это совпадает в своем широтном распределении с областью пересечения минимальных ВПО и повышенных градиентов ТПО, выделенной на рис. 3.

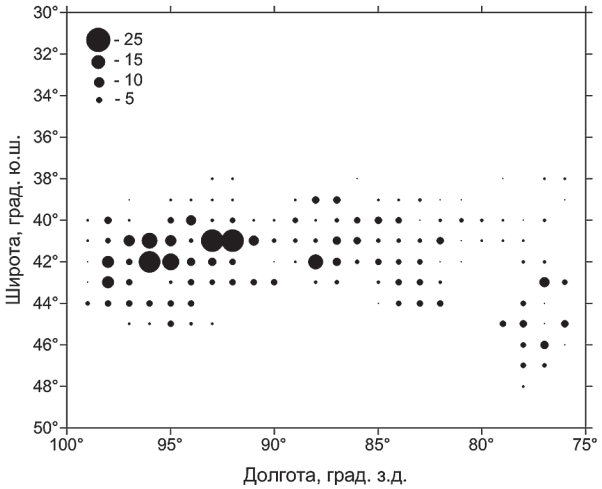


Рис. 3. Повторяемость (количество случаев) совпадения условий градиент ТПО в пределах 0,02–0,06 °С/миля и значений ВПО меньше ±5 см. Величина точек пропорциональна повторяемости

Однако по долготе область экстремальных градиентов смещена на запад. Такое расхождение можно объяснить прежде всего тем, что данные выловов АтлантНИРО охватывают другой период времени, в данной работе рассматривается состояние вод почти на 12 лет позже, за это время в данном регионе могли измениться различные гидрологические характеристики. Так, известно, что для Южного субтропического фронта в его восточной части межгодовая изменчивость в положении достигает 5° широте [3]. Поэтому по данным за 1980–1991 гг. можно только примерно оценить, насколько успешен прогноз скопления рыб в зоне, выделяющейся на рис. 3.

Сопоставление района экстремальных градиентов и области выловов в экспедиции АтлантНИРО в 2002–2003 гг. [8] не принесло положительных результатов, поскольку в ходе экспедиции была исследована лишь небольшая область в переделах рассматриваемого в данной работе района, а именно в полосе от 38 до 40° ю.ш., соответственно, и нет данных по вылову южнее 40° ю.ш.

Вариант промысловых планшетов № 2. В этом случае строились промысловые планшеты по значениям градиентов ТПО и ВПО. Так же, как и для варианта № 1, выделялись области градиентов ТПО от 0,02 °С/миля и более, а градиенты ВПО рассматривались в пределах от 0 до 0,1 см/милю. При рассмотрении всего объема карт было выявлено, что районы с повышенным градиентом ТПО в основном совпадают с участками акватории, где градиент ВПО минимален. Для того чтобы выявить эти области, так же как и для варианта № 1, в одноградусной сетке было

рассчитано число совпадений этих условий. Результаты вычислений представлены на рис. 4 в виде карты.

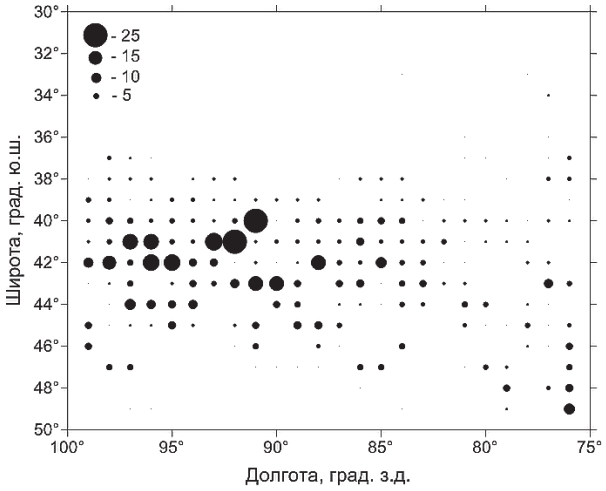


Рис. 4. Повторяемость (количество случаев) совпадения условий градиент ТПО в пределах 0,02–0,06 °С/миля и градиент ВПО меньше 0,1 см/миля. Величина точек пропорциональна повторяемости

На рис. 4 выделяется область в полосе между 38° и 44° ю.ш., где наиболее часто одновременно наблюдались минимальный градиент ВПО и повышенный градиент ТПО. Наибольшая повторяемость совпадений приходится на широту 40–42° ю.ш. и долготу 90–93° з.д. Если сравнить рис. 4 и рис. 3, то можно отметить их схожесть: максимум повторяемости располагается в квадрате 90–97° з.д. и 40–44° ю.ш., вся область вытянута вдоль параллели. Кроме того видно, что малый градиент ВПО в целом по акватории чаще совпадает с большим градиентом ТПО и в двух одноградусных квадратах с центрами 40° ю.ш. 91° з.д. и 41° ю.ш. 92° з.д. это совпадение имеет 100 % вероятность. Если сопоставить рис. 4 с ареалом обитания перуанской ставриды [2], то видно, что выделяемая зона попадает в этот ареал.

Заключение

На основе существующего патента прогнозирования скоплений рыб-планктонофагов [6] были рассмотрены два варианта составления прогностических промысловых планшетов для ЮВТО. В первом варианте использование критериев патента показало его применимость, как для другого промыслового объекта, так и для других гидрологических условий. Во втором варианте выявлено, что максимальные градиенты ТПО во многих случаях сопряжены с минимальными градиентами уровня океана, вследствие чего можно сделать вывод, что потенциально богатые промысловые зоны океана наряду с термическими фронтами могут определяться областями малых градиентов уровня.

Сравнение промысловых планшетов с имеющимися данными о выловах подтвердило перспективность применения данных методов для оперативного рыбопромыслового прогнозирования в ЮВТО.

Основной перспективой дальнейшего исследования видится оценка вклада распределения ВПО и ее градиентов в выделение перспективных для промысла зон, а также выявление связи скоплений ставриды с распределением мезомасштабных океанских вихрей.

Литература

1. *Виноградов В.И., Архипов А.Г., Козлов Д.А.* Питание перуанской ставриды Trachurus symmetricus murphyi и перуанской скумбрии Scomber japonicas peruanus в юго-восточной части Тихого океана [Электронный ресурс] // Калининград. гос. тех. ун-т. Электронный журнал «KSTU NEWS». 2013. № 28. — С. 49–69. — URL: http://www.klgtu.ru/en/research/magazine/2013_28/
2. *Елизаров А.А., Гречина А.С., Котенев Б.Н., Кузнецов А.Н.* Перуанская ставрида Trachurus symmetricus murphyi в открытых водах южной части Тихого океана // Вопр. ихтиологии. 1992. Вып. 6. — С. 61–65.
3. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Т. 1. Изменчивость факторов среды обитания. — СПб.: РГГМУ, 2009. — 278 с.
4. *Мышерин В.А.* Алгоритм внедрения высокоградиентных зон Мирового океана, обладающих повышенной биологической продуктивностью // Вест. Балт. фед. ун-та им И. Канта. 2014. Вып. 10. — С. 169–173.
5. *Сирота А.М., Лебедев С.А., Тимохин Е.Н., Чернышов П.П.* Использование спутниковой альтиметрии для диагноза промыслово-океанологических условий в Атлантическом и юго-восточной части Тихого океанов. — Калининград: АтлантНИРО, 2004. — С. 68.
6. *Старицын Д.К., Устинова Е.И., Филатов В.Н., Еремин Ю.В., Балло А.В.* Способ мониторинга и прогноза мест скоплений пелагических рыб-планктонофагов: патент № 2495566 [Электронный ресурс] // Роспатент: информационно-поисковая система/ ФГБУ Федеральный институт промышленной собственности. — URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2495566&TypeFile=html
7. *Чурин Д.А.* Мезомасштабная динамика вод Антарктической части Атлантики и ее влияние на распределение криля: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.28 [Электронный ресурс] // Балт. фед. ун-т им. И. Канта. 2016. — URL: https://www.kantiana.ru/upload/iblock/0e4/dissertatsiya-churin-d.a..pdf
8. *Чухлебов Г.Е., Каширин К.В., Чернышков П.П.* Научно-поисковая экспедиция НИС «Атлантида» в юго-восточную часть Тихого океана // Рыбное хоз. 2004. № 2. — С. 18–23.
9. *Parent L., Ferry N., Barnier B., Garric G., Bricaud C., Testut C.-E., Le Galloudec O., Lellouche J.-M., Greiner E., Drevillon M., Rémy E., Molines J.-M.* GLOBAL Eddy-Permitting Ocean Reanalyses and Simulations of the period 1992 to present [Electronic resource] // Sixth WMO Symposium on Data Assimilation NOAA Center for Weather and Climate Prediction / Univ of Maryland, College Park, USA, 7–11 October 2013. — URL: http://das6.umd.edu/program/Daily/slides/9.3-Parent_Laurent.pdf
10. *Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., Schlax M.G.* Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature // Journal of Climate, 2007, vol. 20, p. 5473–5496. — DOI:10.1175/JCLI-D-14-00293.1.

А.В. Зимин

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ В БЕЛОМ МОРЕ

A.V. Zimin

REGULARITIES OF SUBMESOSCALE PROCESSES AND PHENOMENA IN THE WHITE SEA

В работе приведены итоги комплексных гидрофизических исследований, осуществленных в 2006–2014 гг. в акватории Белого моря. Установлены факторы и количественные параметры изменчивости температуры, солености, течений на масштабе меньше приливного цикла в зависимости от морфометрии дна, вертикальной структуры вод и близости фронтальных разделов. Оценен вклад субмезомасштабных структур в горизонтальный и вертикальный турбулентный обмен в разных районах моря.

Ключевые слова: наблюдения, внутренняя волна, вихрь, фронт, прилив, Белое море.

The paper presents the results of complex hydrophysical studies in summers 2006–2014 in the White Sea. The factors and quantitative parameters of temperature, salinity and current variability inside tidal period are established, depending on the bottom morphometry, stratification and proximity of the frontal regions. The contribution of submesoscale dynamics into horizontal and vertical turbulent exchange in different areas of the Sea is evaluated.

Keywords: observations, internal wave, eddy, front, tide the White Sea.

Введение

В Белом море сильная полусуточная приливная (мезомасштабная) динамика является ключевым фактором, определяющим регулярность и специфические особенности явлений и процессов на локальных акваториях [20, 25]. Однако сведения об изменчивости процессов на временных масштабах от нескольких минут до полусуток (в данной работе они будут называться субприливными) и ассоциируемых с ними субмезомасштабных явлений, которым в Белом море соответствует пространственный масштаб от сотни метров до десяти километров, носят характер качественных оценок или гипотез. Это препятствует эффективному описанию и прогнозированию гидрологических условий, важных для решения прикладных задач, имеющих существенное оборонное и хозяйственное значение.

Белое море является одним из наиболее изучаемых окраинных бассейнов Северного Ледовитого океана [1, 3, 27, 29]. В нем определен состав водных масс, выявлена сезонная изменчивость вертикальной структуры вод, показана тесная связь изменчивости термохалинных полей с синоптическими и приливными явлениями. Установлены основные фронтальные разделы и выявлена их значительная сезонная изменчивость. Мощные приливные процессы создают доминирующие на акватории квазипериодические полусуточные приливные течения. В районах, где хорошо

выражена стратификация, под влиянием приливно-отливных течений должны возникать внутренние волны (ВВ) полусуточного периода, что было показано по результатам численного моделирования [16, 24]. В районах генерации внутренние приливные волны могут иметь амплитуды до 10 м, однако, как показывают расчеты, при распространении они быстро затухают вблизи очагов генерации. Надежных наблюдений внутренних приливных волн в Белом море практически не было, что не позволяло подтвердить или опровергнуть результаты моделирования.

Вихри с пространственными масштабами порядка единиц километров и временем жизни несколько часов были зарегистрированы на границе пролива Горло с помощью ИК-радиометра еще в 1985 г. [3], и считается, что их образование связано со сдвиговой неустойчивостью приливного течения. Однако до настоящего времени нет сведений об особенностях пространственной изменчивости характеристик малых вихрей на акватории Белого моря.

Использование данных дистанционных наблюдений высокого разрешения [14, 18] позволило обнаружить значительную для всего моря мезомасштабную изменчивость температуры и идентифицируемых по ней фронтальных разделов. Известно также, что установившиеся фронты совершают периодические перемещения на 6–8 км вдоль векторов приливных течений с полусуточным периодом [29]. Мезомасштабные особенности динамики вод наблюдались и в ходе экспедиционных исследований [13, 28]. Распределения гидрологических элементов по пространству указывали на возможность меандрирования фронтальных разделов с отрывом от них вихревых образований с масштабами до 10 км. Однако эти спутниковые и контактные данные не позволили регистрировать и описывать характер мезомасштабной изменчивости фронтальных разделов. Полностью отсутствуют оценки связи фронтальной динамики и особенностей формирования малых (субмезомасштабных) вихрей и короткопериодных внутренних волн, которые могут существенным образом влиять на процессы вертикального и горизонтального обмена на акватории моря.

Океанологические наблюдения последних лет в Белом море [12, 26] позволили обнаружить значительную короткопериодную изменчивость течений, температуры и солености на отдельных акваториях. Например, в 2010 г. в юго-западной части моря неоднократно регистрировались колебания термоклина высотой 15–17 м и периодом 15–20 мин [4], которые были интерпретированы как проявления короткопериодных внутренних волн. Однако на данный момент отсутствуют сведения о пространственно-временном распределении короткопериодных внутренних волн, хотя Белое море является областью интенсивной диссипации приливной энергии в системе морей Северо-Европейского бассейна [15], и представляется, что короткопериодные внутренние волны могут наблюдаться регулярно и вносить значительный вклад в перемешивание на обширных акваториях. Более того, подробное описание особенностей гидрологических процессов и явлений на субприливных временных масштабах до сих пор отсутствует [22].

Остается открытым вопрос о роли короткопериодной изменчивости в турбулентном перемешивании на различных акваториях Белого моря. Отсутствуют основанные на наблюдениях оценки коэффициентов горизонтального и вертикального турбулентного обмена, учитывающие влияние субприливных процессов и необходимые для верификации результатов численного моделирования. Обычно в численных моделях

эти коэффициенты задаются как параметры, с помощью которых можно добиться достаточно хорошего согласия полученных решений и результатов наблюдений в разные годы [2]. Это препятствует эффективному описанию и прогнозированию гидрологических условий, важных для решения прикладных задач, имеющих оборонное и хозяйственное значение в условиях меняющегося климата.

Цель работы состояла в том, чтобы на основе анализа систематических высокоразрешающих контактных и дистанционных наблюдений установить пространственно-временные закономерности субмезомасштабной изменчивости процессов и явлений в Белом море в зависимости от фоновых гидрометеорологических условий, приливной и фронтальной динамики.

Материалы и методы

Методологическую основу работы составлял подход, базирующийся на получении и комплексной обработке результатов разнородных высокоразрешающих по времени и пространству контактных и дистанционных наблюдений, путем их сопоставления, картографирования, статистического анализа, а также теоретического анализа факторов и процессов, формирующих изменчивость гидрофизических полей на субмезомасштабном интервале изменчивости в приливном море.

Исходными данными для исследования являлись: данные учащенных по времени и пространству наблюдений на океанографических полигонах и разрезах, выполненные в летние сезоны 2006–2014 гг. в различных районах Белого моря (рис. 1) по методике, защищенной авторским свидетельством [6]; радиолокационные изображения: Envisat ASAR, Radarsat-1, Radarsat-2 за 2007, 2009–2012 гг.; данные по температуре поверхности моря MODIS Aqua и Terra за 2010 г. Дополнительно привлекались открытые архивы данных моделирования баротропного прилива и метеорологических карт приземного анализа.

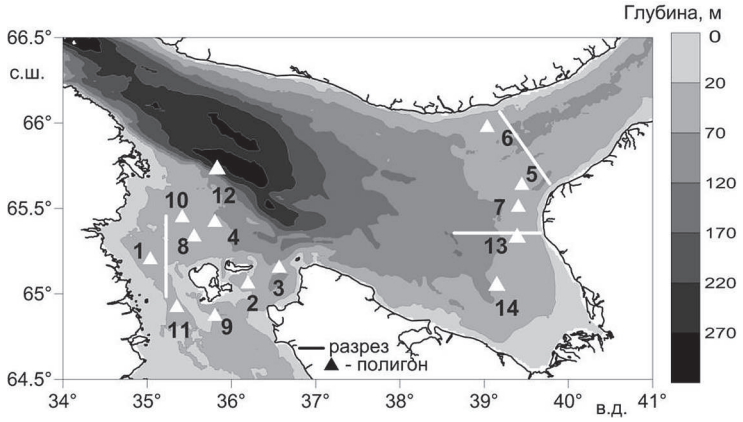


Рис. 1. Схема расположения полигонов и разрезов контактных измерений, выполненных в 2006–2014 гг., совмещенная с картой глубин.
Треугольниками обозначены местоположения полигонов, линиями — положения разрезов

Классические гидрологические подходы, основанные на анализе данных стандартных океанографических станций, дали возможность определить особенности вертикальной стратификации вод, индексы наблюдаемых водных масс, положения фронтальных разделов и т.д. Это позволило отнести районы, на которых выполнялись специальные натурные эксперименты, к участкам акватории с тем или иным характерным для моря гидрологическим режимом. Для каждого выделенного гидрологического района с использованием описательной статистики и спектрального анализа производилась оценка изменчивости характеристик вод (температуры, солености, течений) по данным контактных наблюдений в ходе приливного цикла.

По данным высокоразрешающих контактных измерений определялись повторяемость и обеспеченность высот и периодов колебаний изопикн и, таким образом, находились характеристики ВВ. Взаимным корреляционным анализом данных, полученных в разных точках полигонов, определялись характерные скорости и длины внутренних волн, а также направления их распространения. Процедура анализа высокоразрешающих спутниковых радиолокационных изображений по характерным проявлениям аномалий на морской поверхности [17] позволила картировать проявления пакетов короткопериодных внутренних волн на акватории всего моря. Для валидации спутниковых данных выполнялось сопоставление характеристик внутренних волн, наблюдаемыми in situ и на радиолокационных снимках. На основе спутниковых данных определялись длина цуга волн, количество волн в цуге, длина лидирующей волны, длина гребня лидирующей волны, направление распространения. На основе обобщения спутниковых данных и доступной гидрометеорологической информации производилась оценка временной изменчивости и выявление определяющих ее факторов, районирование особенностей проявлений и выделение очагов генерации короткопериодных внутренних волн.

Для исследования характеристик субмезомасштабной вихревой динамики выполнялись повторяющиеся в разные фазы приливного цикла микрополигонные океанографические съемки. Они позволили установить наличие вихревых образований и определить их характеристики на отдельных участках акватории. Анализ поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей на всей акватории моря был выполнен с использованием тех же спутниковых изображений (методика изложена в [19]). Он выявил районы постоянной регистрации поверхностных проявлений вихрей, их тип и характеристики пространственно-временной изменчивости.

Исследование фронтальной динамики базировалось на сочетании результатов контактных измерений на разрезах поперек фронтальных зон различного происхождения в разные фазы приливного цикла и спутниковых данных о характеристиках температуры поверхности моря. Комбинирование этих данных позволило получить представление о синоптической и мезомасштабной (приливной) изменчивости положения основных фронтальных разделов Белого моря. Затем путем комбинирования полученной информации строились композитные карты, сочетающие идентифицированные положения фронтальных разделов, вихревых образований и ВВ. Анализ комплексных карт позволил исследовать связь изменчивости фронтальных разделов и интенсивности проявлений субмезомасштабных вихрей и короткопериодных внутренних волн.

Для оценки особенностей турбулентного обмена на масштабах приливного цикла и влияния короткопериодной изменчивости на процессы перемешивания на основе учащенных данных о характеристиках течений рассчитывались коэффициенты вертикального (метод Осборна) и горизонтального (метод Эртеля) турбулентного обмена в различных по типам гидрологических условий районах Белого моря.

Количественные характеристики изменчивости гидрофизических полей и тонкой структуры вод на субприливных временных масштабах

На всех полигонах отмечается изменчивость термохалинных полей в двух диапазонах колебаний с характерными полусуточным (приливным) периодом и периодами в десятки минут (ассоциируемые с короткопериодными ВВ). В разных по гидрологическим условиям и морфометрии дна районах они проявляются по-разному:

- в глубоководной части Бассейна и заливов Белого моря наиболее интенсивные колебания имеют полусуточный период и отмечаются на границе промежуточных и глубинных вод;
- в мелководной части Бассейна (в шельфовых неглубоких районах с хорошо выраженной двухслойной структурой вод) под влиянием прилива отмечается резкое изменение вертикальной структуры вод, но основной вклад в изменчивость вносят короткопериодные колебания типа интенсивных внутренних волн (ИВВ), распространяющиеся в слое между поверхностными и промежуточными водными массами бассейна (рис. 2); в проливных районах около фронтальных зон (на границе Бассейна и Горла, на границе Бассейна и Онежского залива) ИВВ наблюдаются каждый приливной цикл, их высота значительно превышает толщину верхнего однородного слоя, а длительность колебаний лежит в диапазоне 10–20 мин;
- в районах структурных фронтальных зон (Соловецкие салмы, юго-западная часть Горла) наблюдается доминирование приливных колебаний, приводящее к чередованию «горловского» и «бассейнового» видов вертикальных структур; в период наличия стратификации могут отмечаться короткопериодные колебания незначительной интенсивности;
- в Онежском и Двинском заливах (мелководные районы заливов) на фоне хорошо выраженных полусуточных вариаций термоклина и галоклина отмечаются слабовыраженные короткопериодные колебания, на которые эпизодически накладываются резкие колебания, идентифицируемые как цуги короткопериодных ВВ.

В районах с «бассейновым» типом стратификации средняя толщина слоя, охваченного значительными колебаниями, составляет порядка 10 м. Средняя амплитуда колебаний по температуре за приливной цикл равняется 5 °С, по солености — 1 ‰. Максимальная изменчивость гидрологических полей отмечалась в районах моря вблизи фронтальных зон. Амплитуды колебаний здесь составляли более 8 °С и 1,2 ‰. Они охватывали значительную толщу вод в нижней части слоя скачка. Максимальные по абсолютной величине колебания отмечаются вблизи горловского фронта. На полигонах в глубоководной части Бассейна амплитуда колебаний характеристик гидрофизических полей была меньше средних оценок для всего моря.

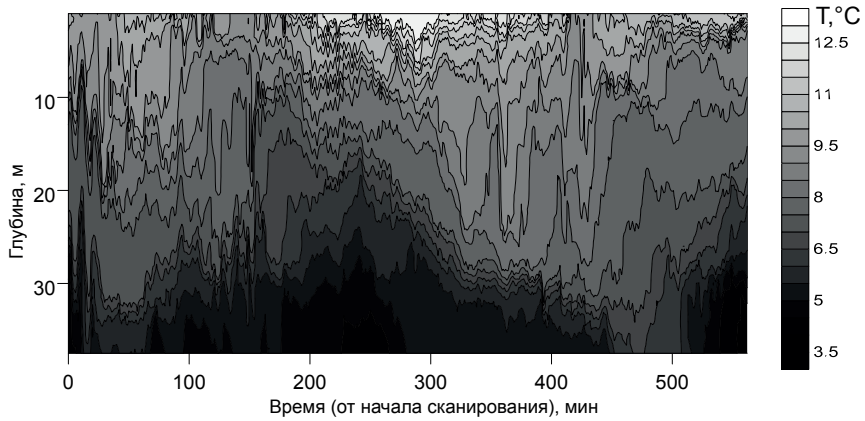


Рис. 2. Временная изменчивость температуры по данным измерений СТД-зондом на полигоне № 7 с 8:53 до 17:10 01.08.2012 г.

В районах с «горловским» типом стратификации изменчивость гидрологических характеристик по вертикали не превышала: 0,2 °С — по температуре и 0,1 ‰ — по солености. Под влиянием прилива колебания охватывали всю водную толщу.

Для изучения статистической структуры временных рядов температуры и солености на масштабах приливного цикла и менее использовался спектральный анализ. Исходные ряды наблюдений на каждом полигоне разбивались на блоки, соответствующие двум приливным периодам. Для каждого блока выделялась трендовая составляющая гармонического колебания с периодом волны M_2 (12, 24 ч) и оценивался ее вклад в общую дисперсию. Из исходного ряда удалялся тренд. Получался ряд отклонений от тренда, для которого проводился анализ (пример см. рис. 3).

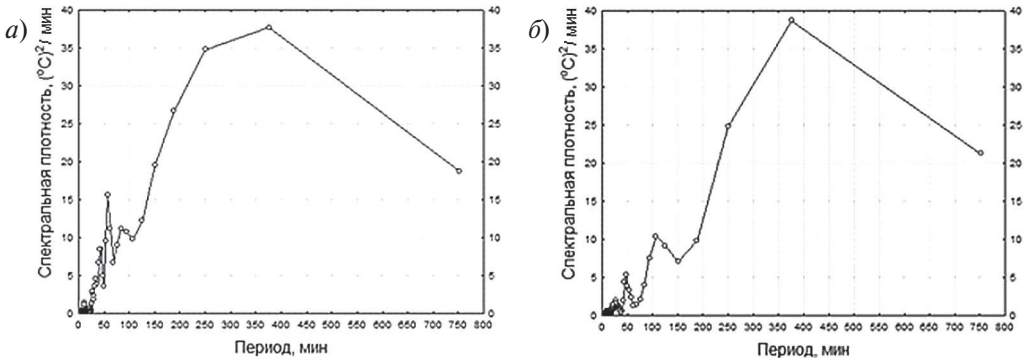


Рис. 3. Функция спектральной плотности с удаленным трендом (M_2) по данным наблюдений за температурой на буйковой станции с помощью прибора JFE Alec, установленного на горизонте 12 м (*а*) и 9 м (*б*) на полигоне № 4 (Бассейн) 24 июля 2012 г.

В результате анализа на периодах меньше приливного были выделены характерные масштабы: от 12 до 2 ч; от 2 ч до 50 мин, от 50 до 4 мин. Для каждого из выделенных

масштабов рассчитывался вклад в общую дисперсию ряда путем суммирования каждой гармоники, попавшей в данный диапазон.

Колебания с периодом, соответствующим приливу, описывают в среднем 62 % от общей дисперсии исходного ряда, колебания в диапазоне от 2 до 12 ч — 26 %, от 50 мин до 2 ч — 5 %, менее 50 мин — 7 %. Резко отличается от общих тенденций область на границе Бассейна и Западной Соловецкой салмы. Здесь колебания с периодом менее 50 мин вносят вклад в общую изменчивость около 20 %.

Максимальный вклад колебаний с периодом менее 2 ч (до 40 % от общей дисперсии) отмечается в области слоя скачка в шельфовых неглубоких районах моря с хорошо выраженной двухслойной структурой вод около фронтальных зон.

Установлено, что во всех районах моря преобладает устойчивая стратификация вод (температура уменьшается с глубиной, соленость растет), на которую накладываются незначительные по вертикальной протяженности инверсионные (1–2 м) и ступенчатые (1–6 м) структуры. В отдельных случаях величина ступенек достигала 10–15 м.

На большей части акватории моря максимальные тонкоструктурные колебания на профиле температуры отмечаются в области скачка характеристик (на глубине 6–18 м). В среднем пульсации за приливной цикл в области скачка составляют ±2 °С и ±0,5 ‰. При этом горизонты максимальных положительных и отрицательных пульсаций температуры и солености совпадают, что дает основание предполагать волновой характер их происхождения. Максимальные пульсации по температуре на порядок (8–12 раз) превосходят максимальные пульсации по солености. Они отмечаются в районах моря около проливных зон (мористая граница Западной Соловецкой салмы, южная граница Горла). Самые незначительные по абсолютной величине пульсации (менее 0,9 °С и 0,25 ‰) отмечаются в слабо стратифицированных районах моря (центральная часть пролива Восточная Соловецкая салма, юго-западная часть Горла). Кроме того, на этих полигонах максимальная изменчивость отмечается на глубоководных (29–39 м) горизонтах. Что связано с влиянием адвекции вод в придонном слое под влиянием прилива.

Большая часть тонкой структуры формируется под влиянием процессов, связанных с адвективными процессами, не удовлетворяющими условиям изопикничности. Тонкая структура под влиянием ВВ образуется преимущественно в верхнем 30-метровом слое моря в районах около проливных зон (мористые районы у Соловецких салм, южная граница Горла). Механизмы же, связанные с изопикнической адвекцией, проявлялись примерно в 20 % случаев на горизонтах под слоем скачка в стратифицированных районах моря (Бассейн).

Короткопериодные внутренние волны

Представления о статистических характеристиках зарегистрированных короткопериодных ВВ можно получить из табл. 1. Внутреннее волнение не отмечалось только в районах с «горловским» типом стратификации. На всех полигонах поле внутренних волн состоит из двух основных компонент — волн приливных периодов и короткопериодных ВВ. В центральной части Бассейна и заливах преобладают волны с полусуточным периодом. На участках шельфа с выраженной двухслойной структурой вод

преобладает короткопериодное волнение, появляющееся регулярно в определенные фазы приливного цикла. Наблюдаемые короткопериодные ВВ можно отнести к первой моде. Самые интенсивные из них (по высоте) распространялись в виде пакетов с максимальной лидирующей волной в цуге. В отдельных районах, располагающихся вблизи фронтов, постоянно отмечаются волны, близкие по своим характеристикам к интенсивным внутренним волнам (ИВВ). Их высота сопоставима с толщиной верхнего однородного слоя. В районе полигона № 1 (на границе Бассейна и Западной Соловецкой салмы), располагавшегося вблизи пролива и фронтальной зоны, за 5 лет наблюдений наибольшую повторяемость имели ВВ высотой от 3 до 5 м и периодом 12–17 мин. Средняя высота ВВ составляла 4,3 м, а период — 14 мин. Перемежаемость внутреннего волнения составила около 50 %. В ходе каждого приливного цикла в районе полигона наблюдалось не менее 2–3 волн, которые можно отнести к ИВВ. На полигонах, располагавшихся в районах Бассейна вдалеке от фронтальных зон и неровностей дна, короткопериодные ВВ были весьма редким явлением, а ВВ экстремальных высот там вообще не отмечались.

Таблица 1

Пространственная и межгодовая (на примере полигона № 1) изменчивость статистических характеристик ВВ, зарегистрированных по данным контактных наблюдений в Белом море за период 2009–2014 гг.

Полигон (год)	Кол-во КВВ за цикл M_2, шт.	Кол-во КВВ за цикл M_2 высотой > 5 м, шт.	Период КВВ: средний (мин.–макс.), мин	Высота КВВ: средняя (мин.–макс.), м
1 (2009)	33	5	11 (3–36)	3,1 (1–7,8)
1 (2010)	46	13	18 (4–72)	5,6 (1–17,9)
1 (2011)	40	5	12 (3–32)	3,7 (1–13,9)
1 (2012)	57	3	7 (4–34)	2,2 (1–7,7)
1 (2013)	48	1	12 (3–36)	2,2 (1–7,6)
2 (2012)	81	3	7 (3–25)	2,6 (1–9)
3 (2012)	68	5	9 (3–24)	2,5 (1–8,3)
3 (2014)	36	8	14 (3–30)	4,5 (1–15)
4 (2012)	12	0	8 (4–26)	1,5 (1–3)
5 (2012)	12	0	9 (5–21)	1,8 (1–4,9)
6 (2012)	0	0	–	–
7 (2012)	57	2	13 (3–42)	2,5 (1–7,6)
8 (2012)	11	0	8 (4–23)	1,6 (1–3,5)
9 (2009)	25	5	14 (4–58)	3,9 (1–14,7)
10 (2011)	12	0	25 (6–68)	1,6 (1–3,3)
11 (2011)	26	0	6 (2–20)	1,7 (1–4,9)
12 (2013)	3	0	30 (18–41)	1,2 (1–1,8)
13 (2014)	21	4	16 (6-32)	1,8 (1–7,0)
14 (2014)	7	0	26 (18-56)	1(1)

Во всех рассматриваемых районах с «бассейновым» типом стратификации спектры короткопериодных ВВ превосходили модельный спектр Гарретта–Манка, а по закону спадания совпадали с ним. При этом максимальное превышение над модельным спектром наблюдалось на полигоне, расположенном в Восточной Соловецкой салме вблизи неровности дна рядом с фронтом приливного перемешивания.

Оперативный подспутниковый эксперимент для исследования особенностей проявления ВВ на поверхности в Белом море проводился летом 2012 г. на границе Горла и Бассейна [11]. Он включал одновременные судовые и спутниковые наблюдения. Основные задачи работы заключались в описании по данным контактных измерений характеристик короткопериодных внутренних волн в течение приливного цикла, соответствующего гармонике M_2, а также в оценке пространственно-временной изменчивости характеристик ВВ на основе спутниковых снимков радиолокаторов с синтезированной апертурой, получаемых в оперативном режиме, и в сопоставлении результатов разнородных наблюдений.

Сопоставление характеристик ВВ, полученных на основе контактных и дистанционных наблюдений, показало их удовлетворительное соответствие. При глубине залегания пикноклина 8–15 м в РЛ-изображениях находили проявление ВВ с высотами 2–4 м, длинами 200–300 м и периодами 9–12 мин. Стоит добавить, что в 4 из 6 зафиксированных случаев наблюдения ВВ прохождение сликовых полос на поверхности моря отмечалось визуально. Таким образом, сопоставление разнородных наблюдений показало, что короткопериодные ВВ распространяются, в основном, пакетами и находят свое отражение в судовых, спутниковых и визуальных наблюдениях. Регулярность проявлений таких пакетов на снимках и в измерениях in situ в определенные фазы прилива с большой долей уверенности подтверждает их связь с приливной динамикой.

Обобщение спутниковых данных позволило выявить области с различной распространенностью ВВ на акватории Белого моря [5, 8]. По данным спутниковых наблюдений на всех рассмотренных РЛ-снимках было обнаружено 489 пакетов ВВ. Чаще всего ВВ наблюдались в виде пакетов по 2–4 волны с длиной гребня лидирующей волны 16 км. Средняя длина зарегистрированных короткопериодных ВВ — 500 м, период — 12 мин, высота — 2,3 м.

Большинство ВВ зарегистрировано в шельфовых районах с глубинами 30–70 м. В 75 % случаев зарегистрированные проявления ВВ наблюдались в области, охватывающей северо-восток Бассейна, юг Горла и глубоководную часть Двинского залива. Внутри этой области волновые пакеты отмечались чаще всего на границе Горла и Бассейна. В Двинском заливе сигнатуры волн наблюдались реже, преимущественно мористее границы фронта стокового течения реки Северная Двина. Примерно в 20 % случаев отмечались проявления ВВ вокруг Соловецких островов. В основном они привязаны к глубоким частям в районе проливов. Остальные 5 % пришлись на центральную глубоководную часть Бассейна. Не были зарегистрированы ВВ в Кандалакшском заливе, в районах со слабовыраженной стратификацией вод (центральная часть пролива Горло и большая часть Онежского залива) и значительного влияния речного стока (кутовая часть Двинского залива).

Длины волн в пакетах колебались преимущественно в диапазоне от 150 до 1500 м при ширине фронта от 2 до 30 км. Наиболее крупные структуры ВВ отмечались в центральной

части Бассейна. Длины волн там достигали 2,55 км, величина длины фронта лидирующей волны — до 176 км, протяженность пакета поперек фронта — 11,6 км. Они двигались по направлению из Горла, преимущественно в юго-западном направлении, покрывая значительную часть моря. Предполагается, что пакеты ВВ, возникая регулярно в южной части Горла, движутся через все море, трансформируясь при распространении, и окончательно разрушаются в мелководной зоне севернее Соловецкого архипелага.

В отдельных случаях наблюдались системы последовательных пакетов ВВ, пробегающих все море с финальным разрушением в шельфовой зоне у входа в Западную Соловецкую салму. При этом расстояние между цугами составляло 30–40 км, а сами цуги — 3–9 волн. ВВ внутри цуга имели длины от 1,4 до 2,5 км и охватывали значительные акватории моря.

В Двинском заливе волновые пакеты двигаются во всех направлениях. Преобладают группы от 2 до 5 волн длиной 200–1300 м при длине гребня от 3 до 70 км и средней площади 40 км², чаще всего двигающиеся от стокового фронта, образуемого рекой Северная Двина. В области, прилегающей к Соловецким островам, площади пакетов еще меньше, так как цуги волн содержат в себе не более 2–3 волн; там же часто встречались солитоны.

Проявления ВВ на границе Бассейна и Горла чаще регистрировались в сизигию (28 раз), чем в квадратуру (10 раз). Причем часто они отмечались в прилив и как бы «исходили» из одних и тех же районов, что подтверждает преимущественно приливной характер их образования.

В результате исследований выделены типичные районы регистрации ВВ:

- участки вблизи фронтальных зон с ярко выраженной стратификацией вод, в частности на границе Бассейна и Горла, в Двинском заливе, севернее Соловецких островов;
- участки шельфа с глубинами 30–50 м, где при наличии активной динамики сохраняется стратификация вод и присутствуют значительные неровности дна: подводный желоб на границе Бассейна и Горла, районы Западной и Восточной Соловецких салм.

Выделены районы, где проявление ВВ носит случайный характер: а) Бассейн и Кандалакшский залив (глубоководные участки моря, где приливной поток слабо взаимодействует с дном, большинство КВВ приходят туда из других районов); б) центральная часть Горла и Онежского залива (мелководные участки шельфа, воды которых полностью перемешаны под влиянием приливных процессов).

Отметим, что регулярность наблюдений ВВ в определенную фазу волны M_2 и зависимость количества их проявлений от фазы луны [4, 5, 9, 30] подтверждает вывод о преимущественно приливном характере их образования.

Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика

Величина бароклинного радиуса Россби в Белом море в летний период, полученная на основе климатических оценок, варьировалась в пределах 1–8 км [7]. Наименьшие значения отмечаются в мелководных слабо стратифицированных Двинском

и Онежском заливах и Горле. В глубоководной части Бассейна и Кандалакшского залива значения радиуса максимальны и мало отличаются по месяцам.

По данным измерений на полигонах было установлено, что вихревые субмезомасштабные структуры прослеживаются преимущественно над неровностями дна (банками). Их образование отмечается в определенную фазу прилива. Все зафиксированные структуры имели циклонический тип завихренности и охватывали приповерхностные слои (10–20 м), но не всегда четко отражались на поверхностном горизонте. Как правило, образовавшаяся вихревая структура прослеживалась у банки в течение не более 3–4 ч, а затем двигалась в направлении доминирующего потока и быстро разрушалась. Они имели характерное время жизни от 3 до 6 ч.

По спутниковым данным за четыре года были детектированы 162 вихря (рис. 4). Они являются распространенным явлением на акватории Двинского залива и Бассейна Белого моря, а также в проливных зонах вокруг островов Соловецкого архипелага. Число вихревых проявлений увеличивается с мая по июль, при этом в июне и июле их количество составило более 65 %. В мае вихревые образования практически не наблюдались на акватории (всего лишь 2 %). Остальная часть вихрей пришлась на август (около 19 %) и сентябрь (около 14 %).

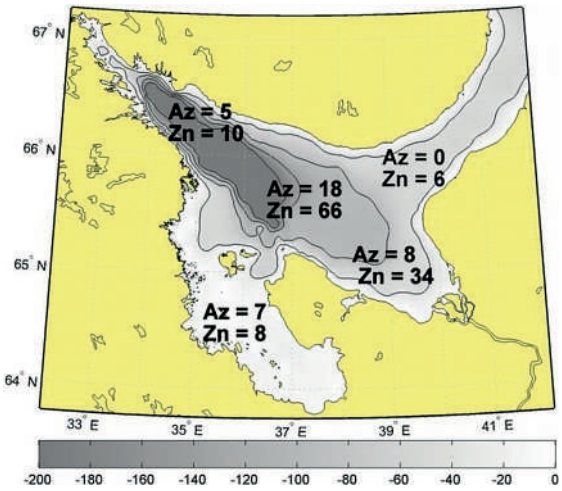


Рис. 4. Количественное распределение вихревых структур по акватории Белого моря

В целом по акватории средний диаметр вихревого образования составляет чуть меньше 5 км, что примерно соответствует среднему значению бароклинного радиуса Россби. Наиболее крупные вихри отмечались в открытой части Бассейна (до 13 км), а самые маленькие — в прибрежной зоне около Карельского берега и Соловецких островов (0,9 км). Чаще всего наблюдались изолированные циклонические вихри диаметром 2–6 км.

В летний период в Белом море в основных фронтальных зонах градиент температуры поверхности моря в 10 раз превышает фоновый градиент по морю. Области, где

проявляются поверхностные фронты, занимают значительную площадь моря, локализованную около среднего положения фронтальных линий. В Двинском заливе эта область занимает почти две трети акватории залива, а величина смещения стокового фронта на его западном фланге достигает за месяц 70 км. Все фронты испытывают наибольшие перемещения в первой половине теплого сезона под влиянием синоптических процессов и речного стока на фоне недостаточного прогрева верхнего слоя. Однако их высокая динамическая активность сохраняется и позже, проявляясь в виде образования языков и меандров, достигающими размеров до нескольких десятков километров. Наибольшая изменчивость поля температуры в виде возмущений фронтального раздела присуща Горловской зоне. Эта динамика является важным элементом водообмена в проливе.

Проведенный анализ [21, 23] показывает, что интенсивная динамика фронтов происходит внутри месячных интервалов, в то время как среднемесячные положения фронтальных линий близки к их средним значениям за лето. Из сравнения месячных (рис. 5, *б*) и декадных (рис. 5, *а*) карт фронтальных линий следует, что при изучении сезонной изменчивости положения фронтов следует ориентироваться на декадные данные, которые характеризуют синоптическую изменчивость, а не на среднемесячные оценки этой изменчивости.

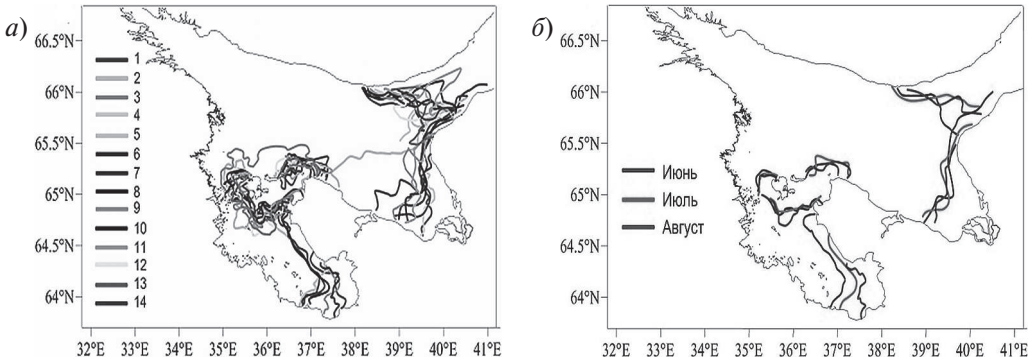


Рис. 5. Сезонная изменчивость положения фронтальных разделов на поверхности Белого моря, где *а* — положения для каждой из 14 декад; *б* — положения по среднемесячным данным

Результаты контактных наблюдений свидетельствуют о значительной мезомасштабной (приливной и ветровой) изменчивости характеристик фронтальных разделов в Белом море. Она проявляется в усилении (ослаблении) значений вертикального и горизонтального градиентов температуры в несколько раз, в колебаниях глубины залегания термоклина до 20 м и в смещениях фронтальных разделов на дистанцию до 15 км. Временной интервал наблюдаемой изменчивости составлял от нескольких часов до суток. Под влиянием приливно-отливных течений и ветра фронтальные структуры различного генезиса могут трансформировать друг друга в Горле. Спутниковые данные подтверждают, что такое взаимодействие часто наблюдается на протяжении всего лета.

Как показал анализ композитных карт, субмезомаштабные вихри и ВВ были детектированы на акватории моря преимущественно во фронтальных зонах или вблизи

от них. В наибольшей степени это характерно для областей изменчивости Двинского и Горловского фронтов. В Двинском заливе наблюдалась повышенная вихревая активность, а с Горловским фронтом мы связываем большую часть наблюдаемых проявлений короткопериодных внутренних волн.

Отмечается, что пик внутриволновой активности приходится на август, а вихревой — на июнь–июль. Повышение вихревой активности происходит на пике формирования стоковых фронтов, когда сезонный прогрев верхнего слоя еще не достиг своего максимума. Большинство вихрей отмечалось в Двинском заливе, в период наибольшей изменчивости его поверхностного фронта. Напротив, когда в середине августа сезонный термоклин сформирован полностью, а активность фронтов проявляется в языках и меандрах, то эти обстоятельства способствуют более эффективной генерации короткопериодных ВВ.

Исследование причин появления субмезомасштабных вихрей показало, что многие из механизмов их генерации реализуются вблизи фронтов или связаны с активной динамикой фронтальных разделов. В частности, неустойчивость шельфово-приливных фронтов и топографические эффекты в приливно-отливном потоке являются специфическим фактором вихреобразования в Белом море.

Механизм образования и проявления ВВ на акватории моря можно разбить на группы. Первая группа — ВВ в центральной части Бассейна, которые распространялись из Горла преимущественно в юго-западном направлении. Это группа регулярно появляющихся ВВ приливного происхождения с очевидным очагом их генерации. Возможный механизм генерации предполагает их образование в результате разрушения бароклинного прилива непосредственно в зоне взаимодействия Горловского термохалинного фронта с сильным приливным потоком. Ко второй группе относятся волны, которые приурочены к областям изменчивости поверхностных фронтов. Размеры гребней ВВ здесь меньше, а выявить преобладающее направление распространения пакетов не удается. Большая часть поверхностных структур приходится на зоны Горловского и Двинского фронтов. Наконец, остальные волны, которые не относятся к фронтальным (по географической привязке) или регулярным структурам с определенным очагом генерации.

В результате можно сделать вывод, что основными источниками образования короткопериодных ВВ в Белом море являются дезинтеграция бароклинных приливных и инерционных движений, которые активно проявляется во фронтальных зонах.

Влияние короткопериодной изменчивости на особенности турбулентного обмена

Расчеты выполнялись с шагом 2 мин за период в два приливных цикла волны M_2. Временной масштаб осреднения исходных данных по проекциям скорости для расчета пульсаций течений составлял 30 мин.

Установлено, что значения коэффициентов горизонтальной турбулентной вязкости в среднем составили 10 м^2/с за приливной цикл; наиболее интенсивный горизонтальный обмен наблюдался в районе Горла, где значения коэффициента горизонтального обмена на порядок превышают средние значения; минимальные значения коэффициентов отмечаются в мелководной части Бассейна на полигонах, выполненных к северу от Соловецких островов и в центральной части Двинского залива, они

на порядок ниже средних оценок; обнаружена анизотропия горизонтального турбулентного обмена (отношение длин осей эллипса составило около 1,5) в прибрежных и проливных районах Белого моря; показано, что максимальные коэффициенты горизонтального обмена наблюдаются в районах повышенной субмезомасштабной вихревой активности или частых проявлений короткопериодных внутренних волн. Отметим также, что, когда на полигоне регулярно регистрировались ИВВ, горизонтальный обмен в целом за приливной цикл был больше в 1,5–2 раза, чем в их отсутствие.

Коэффициент диапикнической диффузии оценивался для слоя от 6 до 35 м (глубины варьировались в зависимости от полигона) с двумя различными шагами по времени. В первом случае расчет был проведен с шагом 2 мин без осреднения исходной информации для того, чтобы учесть эффекты, связанные с ВВ, а во втором случае — после осреднения данных за два часа, чтобы полностью исключить проявления короткопериодных ВВ. Результаты обоих расчетов усреднялись за приливной цикл.

По результатам расчета значения коэффициентов изменяются от 10^{-4} до 10^{-2} м²/с, в среднем составляя $1{,}2 \cdot 10^{-2}$ м²/с. Было установлено, что интенсивность вертикального обмена в мористых районах Бассейна и центральной части Двинского залива в 3–4 раза меньше, чем в шельфовых районах; области, где часто регистрируются короткопериодные ВВ, характеризуются повышенной интенсивностью вертикального обмена; под влиянием ИВВ вертикальный обмен под пикноклином усиливается в 2 раза.

Заключение

На основе обширного массива высокоразрешающих спутниковых и контактных наблюдений за 2006–2014 гг. проведено комплексное исследование субмезомасштабной изменчивости гидрофизических полей в Белом море. Впервые получены числовые оценки внутриприливной изменчивости гидрофизических полей, тонкой структуры вод и особенностей пространственно-временной изменчивости характеристик короткопериодных ВВ, субмезомасштабных вихрей, синоптической и мезомасштабной фронтальной динамики, а также процессов перемешивания для акватории Белого моря в условиях современного меняющегося климата.

В основе исследования лежит разработанная совокупность методов целенаправленного сочетания разнородных спутниковых данных и учащенных контактных наблюдений и их совокупного анализа. Она позволяет оценивать изменчивость характеристик гидрофизических полей и ассоциируемых с ней процессов и явлений на масштабах от сотни метров до десяти километров и от единиц минут до приливного периода на акватории всего моря в теплый сезон [10, 12].

Выявлены новые закономерности изменчивости гидрофизических полей и тонкой структуры вод: на масштабах меньше приливного цикла выделяются три характерных максимума изменчивости — 5–6 ч, 1–2 ч и 8–50 мин; максимальный вклад в изменчивость в интервале от 8 мин до 2 ч (по температуре и солености до 40 % в общую дисперсию рядов) отмечается в области скачка в районах моря с хорошо выраженной стратификацией вод, но вблизи фронтальных зон; такая изменчивость преимущественно обусловлена прохождением интенсивных короткопериодных ВВ с высотами более 10 м; большая часть тонкой структуры вод формируется под влиянием процессов,

связанных с адвекцией, неудовлетворяющей условиям изопикничности; кинематический эффект внутренних волн оказывает значительное влияние на трансформацию тонкой структуры вод в верхнем 30-метровом слое.

Найдены физико-географические закономерности распределения характеристик короткопериодных ВВ: волны встречаются регулярно — в южной части Горла, в Двинском заливе, вокруг Соловецких островов (около фронтов и неровностей дна); волны встречаются эпизодически — в центральной части Бассейна и Онежском заливе (большинство волн приходят туда из других районов); волны не встречаются в северо-западной части Бассейна, Кандалакшском заливе, кутовых частях Двинского и Онежского заливов; короткопериодные ВВ встречаются чаще в виде трехволновых пакетов со средними характеристиками: длина волны — 500 м, период — 11 мин, высота — 2,5 м; максимальные по площади пакеты волн отмечаются в Бассейне; средние характеристики ВВ в течение теплого сезона в одни и те же месяцы слабо меняются от года к году; максимальное количество короткопериодных ВВ отмечается в августе; вблизи от фронтальных разделов и неровностей дна (положительных и отрицательных) ВВ появляются регулярно с приливной периодичностью, около приливных фронтальных разделов в неглубоких районах моря с выраженной двухслойной структурой вод высота ВВ регулярно превышает 10 м [8, 9].

Получены физико-географические закономерности распределения характеристик субмезомасштабных вихрей: субмезомасштабные вихри чаще всего встречаются на акваториях Двинского залива и Бассейна в районах фронтов и свалов глубин; субмезомасштабные вихри чаще всего имеют циклонический тип вращения, диаметр 2–6 км; антициклонические вихри регистрируются в три раза реже циклонических, но их диаметры в среднем больше; средние характеристики вихрей в одни и те же месяцы слабо меняются от года к году; максимальное количество субмезомасштабных вихрей наблюдается в июне–июле; над неровностями дна (банками) около Соловецких островов образование субмезомасштабных вихрей отмечается в определенную фазу прилива, они проявляются в верхнем 10–20-метровом слое и прослеживаются в течение 3–4 ч [7].

Установлены особенности локальной фронтальной динамики: интенсивная синоптическая динамика фронтов происходит внутри месячных интервалов, в то время как среднемесячные положения фронтальных линий близки к их средним за лето и не отражают особенности сезонного хода фронтальной динамики; фронты, в первую очередь стоковые, испытывают наибольшие перемещения в первой половине теплого сезона под влиянием синоптических процессов и речного стока на фоне недостаточного прогрева верхнего слоя, однако их высокая динамическая активность сохраняется и позже, проявляясь в виде образования языков и меандров, преимущественно у приливных фронтов, размерами до нескольких десятков километров; значительная мезомасштабная динамика характеристик фронтальных разделов, возникающая под воздействием прилива и ветра, проявляется в усилении (ослаблении) значений вертикального и горизонтального градиентов температуры в несколько раз, в колебаниях глубины залегания термоклина (пикноклина) до 20 м и в смещениях фронтальных разделов на дистанцию до 15 км [12, 21].

Показана роль фронтов в динамике короткопериодных волн и субмезомасштабных вихрей: значительное число субмезомасштабных вихрей и короткопериодных ВВ

(около 65 %) детектируются во фронтальных зонах или вблизи этих зон; субмезомасштабные вихревые структуры регистрируются преимущественно внутри зон стоковых (Двинская, Онежская) и на периферии структурных (Горловская, Соловецкая) фронтальных зон; повышение вихревой активности происходит на пике трансформации стоковых фронтов в неглубоком пикноклине; циклическая динамика фронта приливного перемешивания в Горле является источником регулярных проявлений значительных по размерам гребней короткопериодных ВВ, которые могут распространяться на 200 км от района генерации и существовать в течение 3–5 циклов полусуточной прилива M_2, пересекая всю акваторию Бассейна [23].

Установлены особенности турбулентного обмена в Белом море на масштабах приливного цикла, учитывающие влияние субприливных явлений: прослеживается анизотропия горизонтального турбулентного обмена в прибрежных и проливных районах Белого моря; максимальные коэффициенты горизонтального обмена наблюдаются в районах повышенной встречаемости субмезомасштабных вихрей или короткопериодных ВВ; интенсивность вертикального обмена в мористых районах Бассейна и центральной части Двинского залива в 3–4 раза меньше, чем в районах около фронтальных зон; под влиянием ИВВ вертикальный и горизонтальный обмен под пикноклином усиливается в два раза.

Литература

1. *Белое* море. Биологические ресурсы и проблемы их рационального использования. Ч. I. — СПб., 1995. — 250 с.
2. *Волженский М.Н., Родионов А.А., Зимин А.В. и др.* Опыт верификации оперативной модели для мониторинга гидрофизических полей Белого моря // Фундам. и прикл. гидрофизика. 2009. № 3. — С. 33–41.
3. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР: Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. Б.Х. Глуховского. — Л.: Гидрометеоиздат, 1991. — 240 с.
4. *Зимин А.В.* Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натурных наблюдений // Океанология. 2012. Т. 52. № 1. — С. 16–25.
5. *Зимин А.В.* Короткопериодная изменчивость гидрофизических полей и характеристик внутреннего волнения в течение полусуточного приливного цикла в шельфовых районах Белого моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 3. — С. 293–303.
6. *Зимин А.В.* Методика выполнения натурных экспериментов по исследованию короткопериодных внутренних волн в морях Северо-Европейского бассейна. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013621214 от 24.09.2013.
7. *Зимин А.В., Атаджанова О.А., Романенков Д.А. и др.* Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. — С. 129–135.
8. *Зимин А.В., Козлов И.Е., Атаджанова О.А. и др.* Комплексный мониторинг короткопериодных внутренних волн в Белом море // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 5. — С. 51–61.
9. *Зимин А.В., Родионов А.А., Жегулин Г.В.* Короткопериодные внутренние волны на шельфе Белого моря: сравнительный анализ наблюдений в различных районах // Фундам. и прикл. гидрофизика. 2013. Т. 6. № 3. — С. 19–33.
10. *Зимин А.В., Романенков Д.А., Атаджанова О.А. и др.* Опыт разработки системы мониторинга короткопериодных процессов и субмезомасштабных структур в Белом море и результаты ее апробации летом 2014 г. // Учен. зап. РГГМУ. 2015. № 41. — С. 116–125.
11. *Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е. и др.* Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 3. — С. 41–55.
12. *Зимин А.В., Романенков Д.А., Родионов А.А. и др.* Экспедиционные исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей Белого моря в августе 2013 г. // Фундам. и прикл. гидрофизика. 2014. Т. 7. № 1. — С. 85–92.

13. *Инжебейкин Ю.И.* Особенности мезомасштабных вариаций абиотических компонентов экосистемы Белого моря // VIII Регион. науч.-прак. конф. «Проблемы изучения, рац. использ. и охраны природ. ресурсов Белого моря». — Архангельск, 2001. — С. 36–39.
14. *Ионов В.В., Шилов И.О.* Особенности распространения речных вод и динамики океанологических фронтов в Белом море по результатам спутниковых ИК-измерений и натурным наблюдениям в летний период // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 1996. Вып. 2. № 14. — С. 53–61.
15. *Каган Б.А., Софьина Е.В., Рашиди Э.Х.А.* О влиянии Белого моря на приливы в соседних окраинных морях Северо-Европейского бассейна // Известия РАН. ФАО. 2013. Т. 49. № 1. — С. 97–112.
16. *Каган Б.А., Тимофеев А.А.* Динамика и энергетика поверхностных и внутренних полусуточных приливов в Белом море // Известия РАН. ФАО. 2005. Т. 41. № 4. — С. 844–850.
17. *Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В. и др.* Районы генерации нелинейных внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА измерений // Современные пробл. дист-го зонд-я Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. — С. 338–345.
18. *Коросов А.А.* Разработка и применение процедуры комплексного дистанционного зондирования для исследования внутриводных процессов в морях и крупных озерах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.28. — СПб., 2007. — 26 с.
19. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный мониторинг морей России. — М.: ИКИ РАН, 2011. — 472 с.
20. *Пантюлин А.Н.* Структура и динамика водного тела Белого моря. Динамика, структура и водные массы // Система Белого моря. Т. II, Водная толща и взаимодействующая с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. — М.: Научный мир, 2012. — С. 309–379.
21. *Родионов А.А., Романенков Д.А., Зимин А.В. и др.* Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика. Состояние и направления исследований // Фундам. и прикл. гидрофизика. 2014. Т. 7. № 3. — С. 29–41.
22. *Родионов А.А., Семенов Е.В., Зимин А.В.* Развитие системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей морской среды в интересах обеспечения скрытности и защиты кораблей ВМФ // Фундам. и прикл. гидрофизика. 2012. Т. 5. № 2. — С. 89–108.
23. *Романенков Д.А., Зимин А.В., Родионов А.А. и др.* Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря) // Фундам. и прикл. гидрофизика. 2016. Т. 9. № 1. — С. 59–72.
24. *Семенов Е.В., Лунева М.В.* Численная модель приливной и термохалинной циркуляции вод Белого моря // Известия РАН. ФАО. 1996. Т. 32. № 5. — С. 704–713.
25. *Семенов Е.В., Булатов М.Б.* Анализ результатов работы оперативной модели гидрофизических полей Белого моря в июле – августе 2008 г. // Доклады АН. 2010. Т. 432. № 3. — С. 410–415.
26. *Серебряный А.Н., Пака В.Т., Корж А.О.* Исследование с помощью ADCP течений и внутренних волн в Белом море // Геология морей и океанов: Мат-лы XVIII Межд. науч. конф. (Школы) по морской геологии. Т. III. — М: ГЕОС, 2009. — С. 245–250.
27. *Система* Белого моря. Т. II, Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / под ред. акад. А.П. Лисицына. — М.: Научный мир, 2012. — 784 с.
28. *Солянкин Е.В., Зозуля С.А., Кровнин А.С., Масленников В.В.* Комплексные исследования экосистемы Белого моря. Термохалинная структура и динамика вод Белого моря летом 1991 г. / под ред. В.В. Сапожникова. — М.: ВНИРО, 1994. — С. 8–25.
29. *Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю.* Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. — Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. — 35 с.
30. *Kozlov I., Romanenkov D., Zimin A., Chapron B.* SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea // Remote Sensing of Environment, 2014, vol. 147, p. 99–107. — DOI:10.1016/j.rse.2014.02.017.

Данная работа частично была выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 15-05-04639_а.

Х. Фарджами, П.А. Голубкин, В.Н. Кудрявцев

РАЗВИТИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНЫХ ЗОНАХ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ВЕТРАХ НА ПРИМЕРЕ ПЕРСИДСКОГО ЗАЛИВА И АРАВИЙСКОГО МОРЯ

H. Farjami, P.A. Golubkin, V.N. Kudryavtsev

WIND-WAVE GROWTH UNDER VARYING WIND CONDITION CASE STUDIES IN THE PERSIAN GULF AND ARABIAN SEA

В работе исследуется развитие ветровых волн в прибрежной зоне на основе альтиметрических измерений. Предложена модификация алгоритма восстановления ветра по альтиметрическим измерениям, которая учитывает влияние развивающегося волнения на отраженный сигнал и существенно улучшает точность определения скорости ветра. Для интерпретации измерений используется обобщение теории подобия на условия развития волн в пространственно неоднородном поле ветра. Показано, что обобщенная модель описывает альтиметрические измерения на количественном уровне.

Ключевые слова: ветровые волны, спутниковый альтиметр, прибрежная зона.

This paper presents a study of wind-waves development in the coastal region on the basis of satellite altimeter measurements. Based on simplified radar cross section model in the waves grows condition suggested the method to correction altimeter standard algorithm which allows significantly improved the accuracy of retrieving altimeter wind speed in the coastal region. The self-similar wave growth under the spatially inhomogeneous wind field is used to interpret of the measurements. The results of this study show that the self-similar model quantitatively can be estimated the altimeter measurements.

Keywords: wind-waves, satellite altimeter, coastal region.

Введение

Понимание характеристик ветровых волн требуется в различных видах деятельности, таких как океанские техники, проектирование прибрежных и морских сооружений. Также эта информация необходима для прогнозирования океанических процессов. По приблизительным фазам/амплитудам модели, то есть спектру волны, можно описать поверхностные колебания моря при наличии океанских волн [11].

Классические законы развития волн [13], основанные на теории подобия, являются подходящим методом для исследования поля ветровых волн при постоянной скорости ветра в прибрежных регионах. Существующие экспериментальные оценки параметров скорости роста волн были проанализированы и систематизированы, например, в работе [2]. В 1990 г. Матт et al. (1991) описали параметры волн с помощью закона разгона, учитывая крутизну доминирующей волны [15].

Более полное писание развития спектра волн в пространстве и времени под воздействием притока энергии от ветра, диссипации энергии за счет обрушений волн

и нелинейных взаимодействий может быть получено на основе решения кинетического уравнения [22]. Kudryavtsev et al. (2015) предложили простую аналитическую модель развития волн, основанную на обобщении теории подобия для случая поля ветра, меняющегося в пространстве и времени [14].

В данной статье анализируется эволюция ветровых волн в прибрежных районах в условиях пространственной изменчивости ветра, а именно в Персидском заливе и Аравийском море. Для коррекции стандартных альтиметрических алгоритмов предлагается метод, который может быть использован для улучшения точности восстановления скорости ветра в прибрежных зонах.

Данные и методология

Альтиметрические измерения. Спутниковая миссия по изучению топографии поверхности Мирового океана (OSTM)/Jason-2 была запущена в июне 2008 г. в рамках сотрудничества между Национальным управлением по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA), Европейской организацией спутниковой метеорологии (EUMETSAT), Национальным центром космических исследований (CNES) и Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA) с целью продолжения предоставления измеренных параметров океана высокого качества и обеспечения оперативной информацией для моделирования и прогнозирования [4]. Основным инструментом на борту спутника Jason-2 является Poseidon-3 — двухчастотный альтиметр, работающий в *Ku*-диапазоне (13,575 ГГц) и *C*-диапазоне (5,3 ГГц). Вторая частота в основном используется для получения коррекции, учитывающей содержания электронов в ионосфере. Данные, используемые в работе [геофизические данные (GDR)], в свободном доступе предоставляются NOAA (http://data.nodc.noaa.gov/).

SARAL/AltiKa — первый спутник, который оснащен альтиметром на *Ka*-диапазона (35.75 Ггц) с хорошей разрешающей способностью приложений по трассе. Он был запущен 25 февраля 2013 г. в рамках франко-индийского проекта по мониторингу окружающей среды с циклом в 35 дней. Данные SARAL/AltiKa доступны на сайте AVISO (http://www.aviso.altimetry.fr/).

Область исследования. Высота значимых волн (H_s) симулируется с помощью теории подобия развития ветровых волн в северо-западной части Индийского океана, то есть в Аравийском море и Персидском заливе (рис. 1). Аравийское море является одним из прекрасных регионов биологической адаптации к окружающей среде в результате сезонных колебаний погоды. Сильный ветер почти постоянно дует над северной частью Индийского океана: с юго-запада в период летних муссонов и с северо-востока во время зимних муссонов [1, 20].

Персидский залив — полузакрытый бассейн, часть Индийского океана, расположен между Ираном и Аравийским полуостровом. В связи со стратегически выгодным расположением и богатыми природными ресурсами этот залив играет важную роль в экономике и политике региона и мира. В Персидском заливе ветер дует постоянно с северо-запада с ноября по март [19], поэтому этот регион может быть рассмотрен как «природная лаборатория» для анализа теории развития волн.

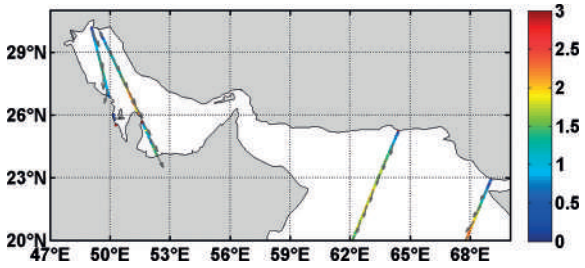


Рис. 1. Район исследования и высоты значимых волн вдоль рассмотренных траекторий пролета альтиметра

Энергия волн. Когда ветер дует непрерывно над поверхностью моря, ветровые волны растут, а частота волн концентрируется вокруг некоторого пика. Во многих исследованиях эволюция волн при постоянном ветре анализируется в идеализированном виде с помощью закона разгона, например [13, 16]. С учетом обобщения теории подобия, представленного в работе [14], пространственно-временное уравнение пика спектра частоты (ω) может быть записано в виде:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + c_g \frac{\partial \omega}{\partial x} = \left(\frac{g}{U_{10}} \right)^2 \varphi(\alpha), \tag{1}$$

где ω_p — частота спектрального пика; c_g — групповая скорость волн; U_{10} — скорость ветра на высоте 10 м; g — ускорение силы тяжести и $\varphi(\alpha)$ — безразмерная универсальная функция возраста волн, которая для стационарного состояния может быть выражен как [14]:

$$\varphi(\alpha) = 1/2qc_\alpha^{1/q}\alpha^{-1/q}, \tag{2}$$

где $\alpha = u/c_p$ — величина, обратная возрасту волн (далее — «обратный возраст волн»); c_p — фазовая скорость спектрального пика. Здесь c_α и q — некоторые константы, соответствующие используемому закону разгона. Существует много экспериментальных исследований для оценки этих констант, которые обобщены в обзорах [2, 21].

В данной работе используются параметры, рекомендованные в проекте JONSWAP: эмпирические константы $c_q = 21{,}99$ и $q = -0{,}33$ [2, 10]. При стационарном, но изменяющемся в пространстве поле ветра изменение частоты пика вдоль трека альтиметра представляется в виде

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} = q\omega^{(1-1/q)} \frac{g^{(1+1/q)}}{u^{(2+1/q)}} c_q^{1/q}. \tag{3}$$

Изменение частоты спектрального пика вычислялось с помощью метода Рунге–Кутты 4-го порядка [18].

Ограничение роста волн контролируется обратным возрастом волн. Состояние моря называется полностью развитым, когда обратный возраст волн близок к 0,84, а для начальных и последующих стадий развития волн это значение равно 1 и более 2,0 соответственно [6].

Общая безразмерная энергия волн может быть описана с помощью безразмерной частоты спектрального пика с использованием уравнения (3). Отношение энергии волн (e) и высоты значимых волн (H_S) может быть определено как $H_s = 4\sqrt{e}$. Безразмерная энергия рассчитывается с помощью безразмерной частоты пика как:

$$\tilde{e} = c_e c_p^{q/p} \tilde{\omega}^{p/q}, \tag{4}$$

где эмпирические константы JONSWAP $c_e = 1{,}6 \times 10^{-7}$, а $p = 1{,}0$; безразмерная частота — $\tilde{\omega} = \omega u/g$; безразмерная энергия — $\tilde{e} = eg^2/u^2$.

Таким образом, с помощью уравнения (4) можно рассчитать высоту волны в прибрежном районе в пространстве при изменяющихся условиях ветрового воздействия. Для сравнения рассчитанных высот волн со значениями, присущими полностью развитому волнению, используется эмпирическое уравнение Пирсона–Московица [17]: $Hs = 0{,}22U_{10}^2/g$.

Корректировка ветра. В данной работе используются альтиметрические данные высот волн по стандартам продуктов. Другим стандартным продуктом альтиметра является ветер. Однако использование стандартного продукта по ветру в прибрежных зонах может быть сопровождаться с ошибкой, как показано в работах [7, 8]. При развитии волн в прибрежной зоне альтиметрический ветер, рассчитанный с помощью стандартного алгоритма, будет демонстрировать «ложный» рост, поэтому в подобных условиях необходимо корректировать алгоритм восстановления скорости ветра. На основе моделирования альтиметрического сигнала от морской поверхности в условиях развивающегося волнения исправляется альтиметрические алгоритмы получения скорости ветра в прибрежных зонах.

Следуя упрощенному приближению геометрической оптики, удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) морской поверхности при зондировании надир оценивается как [3, 12]

$$\sigma_{\text{em}}^0 0^\circ = \frac{|R_0|^2}{MSS} \exp\left(-4k_r^2 h_s^2\right), \tag{5}$$

где R_0 — коэффициент Френеля при нулевом угле падения; $\exp(-4k_r^2 h_s^2)$ — коррекция коэффициента отражения для учета влияния мелкомасштабной (по сравнению с длиной радиоволны) шероховатости; k_r — волновое число радара; h_s^2 — дисперсия малой высоты шероховатости в диапазоне волновых чисел $k > k_d$ и MSS — средняя квадратичная наклона. MSS и h_s^2 рассчитываются с помощью спектра волн как

$$MSS\left(\alpha, u_{10}, k_r\right) = \int_0^{k_d} B_0\left(\alpha, u_{10}, k\right) d\ln k, \tag{6}$$

$$h_s^2 = \int_{k_d}^{\infty} k^{-2} B_0\left(\alpha, u_{10}, k\right) d\ln k, \tag{7}$$

где k — волновое число; B_0 — всенаправленная волна насыщения спектра; U_{10} — скорость ветра на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью;

g — ускорение свободного падения; $\alpha = k_p^{1/2} U_{10} g^{-1/2}$ — обратный возраст волны; k_d — волновое число, разделяющее морскую поверхность на крупно- и мелкомасштабную.

В настоящем исследовании мы используем спектр, предложенный в [5], где закон развития волн представлен формулой

$$\alpha = 0{,}84 \times \left\{ \tanh\left(\tilde{x} / \tilde{x}_0 \right)^{0{,}4} \right\}^{-0{,}75}, \qquad (8)$$

где $\tilde{x}$ — безразмерный разгон ($\tilde{x} = xg/u^2$), $\tilde{x}_0 = 2{,}2 \times 10^4$.

Альтиметрический ветер зависит от состояния моря и обычно рассчитывается с помощью стандартного алгоритма [9]. Этот алгоритм создан для развитого волнения в открытых океанах. В прибрежных зонах, где ветер постоянно дует с берега, волны развиваются с увеличением разгона. При развитии волн альтиметрический ветер, рассчитанный с помощью стандартного алгоритма, будет демонстрировать ложный рост, поэтому в подобных условиях необходимо корректировать скорость ветра.

В работе предлагается метод коррекции алгоритма восстановления ветра по данным альтиметрических измерений, σ^0_{Ku} в прибрежной зоне. Восстановление ветра по альтиметрическим измерениям подразумевает наличие эмпирической зависимости типа $U_{10} = U_{10}(\sigma^0_{Ku})$. Для этой цели сначала с помощью модели УЭПР рассчитывается отличие УЭПР ($\Delta\sigma^0$) при полностью развитом волнении ($\sigma^0(\infty, U_{10})_{\text{модель}}$) от УЭПР морской поверхности с развивающимися волнами ($\sigma^0(x, U_{10})_{\text{модель}}$) для *Ku*-диапазона, $\Delta\sigma^0 = \sigma^0(x, U_{10})_{\text{модель}} - \sigma^0(\infty, U_{10})_{\text{модель}}$ (рис. 2, *б*). Далее это отличие вычитается из измеренных значений УЭПР, σ^0_{Ku}, и тем самым происходит коррекция измеряемых значений на эффект развития волн в прибрежной зоне ($\sigma^0_{\text{исп}} = \sigma^0_{Ku} - \Delta\sigma^0$). «Правильные» значения скорости ветра определяются после подстановки $\sigma^0_{\text{исп}}$ в зависимость $U_{10} = U_{10}(\sigma^0_{\text{исп}})$ для расчета скорости ветра по скорректированным альтиметрическим измерениям. В данном случае $U_{10} = U_{10}(\sigma^0_{Ku})$ описывается линейной функцией (рис. 2, *а*). Поэтому модифицированный алгоритм восстановления скорости ветра по альтиметрическим измерениям в прибрежной зоне имеет вид

$$\left(U_{10}\right)_{\text{исп}} = -3{,}12\sigma^0_{\text{исп}} + 49{,}6. \qquad (9)$$

С помощью этой корреляции получается более точная оценка скорости ветра в прибрежном районе при условиях развивающегося волнения.

Результаты. Особенности развития ветрового волнения анализируются в прибрежной зоне Индийского океана в условиях пространственной изменчивости ветра на основе альтиметрических измерений и полуэмпирической модели развития волн.

Первый случай — проход № 118 спутника Jason-2 за 8 марта 2013 г. над Персидским заливом. В этом случае Персидский залив находится под воздействием ветра (местное название — «шималь»), который дует с северо-запада, его направление приблизительно совпадает с траекторией альтиметра.

На рис. 3, *а* показаны эволюция высоты значимых волн с использованием обобщения теории подобия для полностью развитого волнения, скорость приводного ветра по данным альтиметра, а также исправленная скорость ветра вдоль трека альтиметра. Расстояние между точками вдоль траектории альтиметра составляет 5,8 км.

Представленный сегмент альтиметра, таким образом, соответствует 400 км между первым и последним измерениями. На этом расстоянии высота значимых волн вырастает с 0,3 м до примерно 2 м. Скорость приводного ветра, восстановленная по данным альтиметра, увеличивается с 4 до 10,5 м/с. Используя эмпирическую зависимость развития ветрового волнения, мы оценили реальный ветер, используя модифицированную процедуру восстановления скорости ветра, описанную выше.

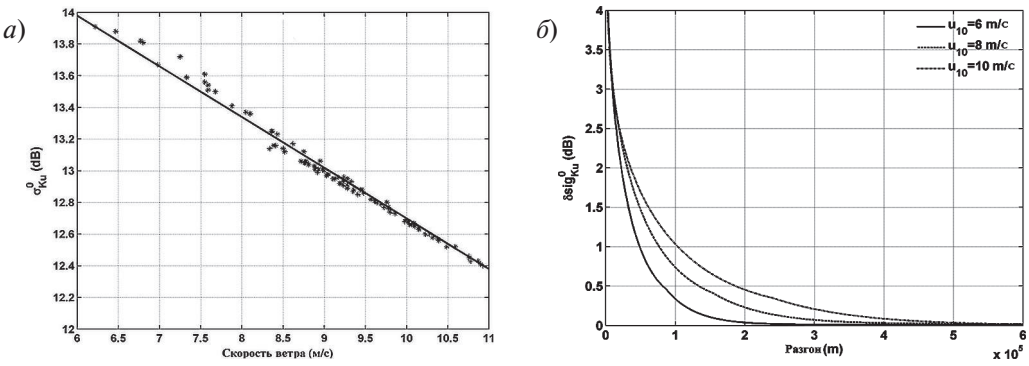


Рис. 2. *а* — эмпирическая зависимость между альтиметрической УЭПР *Ku*-диапазона и ветром для Jason-2; *б* — модельный расчет разницы УЭПР *Ku*-диапазона морской поверхности при конечном и бесконечном разгоне волн для скорости ветра 6 м/с (сплошная линия), 8 м/с (пунктирная линия) и 10 м/с (штрих-пунктирная линия)

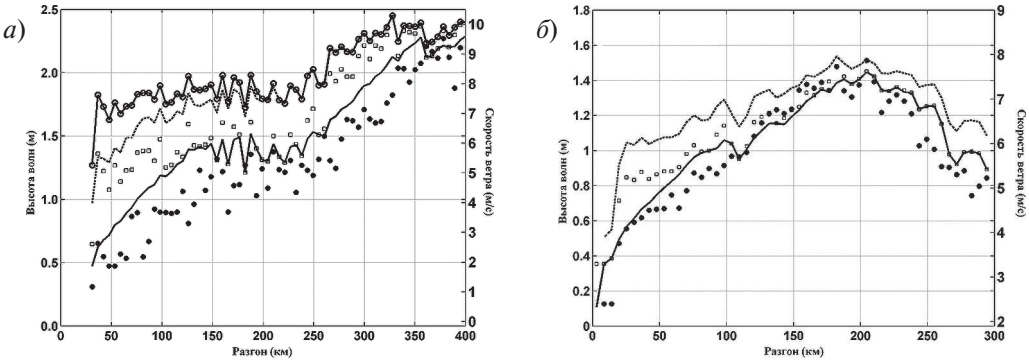


Рис. 3. *а* — Спутник Jason-2, проход № 118 за 8 марта 2013 г. в Персидском заливе; *б* — спутник SARAL/AltiKa, проход № 655 за 18 октября 2014 г. в Персидском заливе; *Hs* — по данным альтиметра (символы ●); *Hs* — по модели (сплошная линия); *Hs* — по теории Пирсона–Московица (символы □); приемлемый ветер (точки вдоль пунктирной линии, -o-); альтиметрический ветер (пунктирная линия), правая ось

Другой случай — проход № 655 спутника SARAL/AltiKa за 18 октября 2014 г., также иллюстрирует развитие волн в Персидском заливе. Измерения по данным альтиметра и модельные высоты значимых волн, полученные на основе обобщения теории подобия

вдоль траектории альтиметра на расстоянии меньшем, чем 300 км от берега, показаны на рис. 2, *б*. Скорость альтиметрического ветра увеличивается с 4 до 8 м/с, высота значимых волн растет от 0,1 до 1,4 м, а потом уменьшается до 0,8 м из-за влияния береговой линии.

На рис. 4, *а* показаны данные измерения спутника Jason-2 для прохода № 207, 24 декабря 2013 г. и результаты моделирования ветровых волн с разгоном 400 км в Аравийском море. В этом случае волны растут с 0,3 до 2 м, а скорость ветра по альтиметрическим данным увеличивается с 3 до 10 м/с, но реальный ветер, полученный с помощью модели радиолокационного отражения, меняется с 6 до 10 м/с. Еще один случай за 28 декабря 2013 г., проход № 55 спутника Jason-2 в северной части Аравийского моря с разгоном около 300 км показан на рис. 4, *б*. В этом случае скорость реального ветра увеличивается с 3 до 9 м/с, а высота волн меняется с 0,2 до 1,7 м.

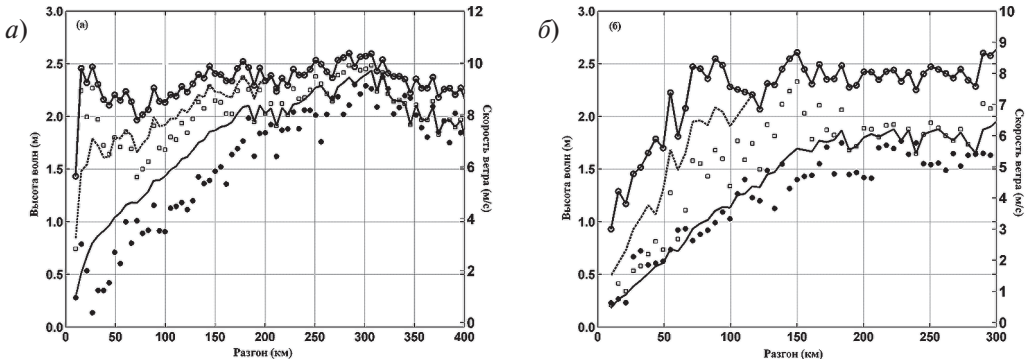


Рис. 4. *а* — то же, что на рис. 3, но для Jason-2, 207-й проход за 24 декабря 2013 г. в Аравийском море; *б* — Jason-2, 55-й проход за 28 декабря 2013 г. в Аравийском море

Заключение

Применение спутниковой альтиметрии в открытых океанах хорошо зарекомендовало себя, но измерения в прибрежных районах или закрытых бассейнах могут потребовать разработки более специализированных алгоритмов [7, 8]. Отраженный альтиметрический сигнал в прибрежных зонах существенно зависит от степени развития ветрового волнения. Для решения этой проблемы на основе моделирования отраженного сигнала разработан метод коррекции стандартных альтиметрических алгоритмов, который позволяет улучшить точность альтиметрической скорости ветра в прибрежных зонах. Этот метод может быть использован в оперативной практике.

Потом проведен анализ ветрового волнения в условиях пространственной изменчивости поля ветра в прибрежной зоне на основе совместного использования альтиметрических измерений и моделирования по полуэмпирической модели развития волн.

Результаты анализа показывают, что этот подход является эффективным инструментом исследования волн и может быть широко использован для получения новых данных о ветровом волнении в прибрежных исследованиях, необходимых как для прикладных, так и фундаментальных исследований.

Литература

1. *Фарджами Х., Шапрон Б.* Особенности поля ветра в северной части Индийского океана на основе анализа данных NCEP/NCAR за период 2010–2014 гг. // Учен. зап. РГГМУ. 2015. № 39. — С. 142–149.
2. *Badulin S.I., Babanin A.V., Zakharov V.E., Donald R.* Weakly turbulent laws of wind-wave growth // Journal of Fluid Mechanics, 2007, vol. 591, p. 339–378.
3. *Chapron B., Katsaros K., Elfouhaily T., Vandemark D.* A note on relationships between sea surface roughness and altimeter backscatter // Remote Sensing and Global Modelling, 1995, p. 869–878.
4. *Dumont J.P.* OSTM/Jason-2 Products Handbook. — 2015, JPL: STM-29-1237, NOAA/NESDIS: Polar Series/ OSTM J400.
5. *Elfouhaily T., Vandemark D., Gourrion J., Chapron B.* Estimation of wind stress using dual-frequency TOPEX data // Journal of Geophysical Research: Oceans, 1998, vol. 103, iss. C11, p. 25101–25108. — DOI:10.1029/98JC00193.
6. *Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D.* A Unified Directional Spectrum for Long and Short Wind-Driven Waves // Journal of Geophysical Research: Oceans, 1997, vol. 102, iss. C7, p. 15781–15796. — DOI:10.1029/97JC00467.
7. *Farjami H., Golubkin P., Chapron B.* Impact of the sea state on altimeter measurements in coastal regions // Remote Sensing Letters, 2016, vol. 7, iss. 10, p. 935–944. — DOI:10.1080/2150704X.2016.1201224.
8. *Golubkin P.A., Chapron B., Kudryavtsev V.N.* Wind Waves in the Arctic Seas: Envisat and AltiKa Data Analysis // Marine Geodesy, 2014, vol. 38, iss. 4, p. 289–298. — DOI:10.1080/01490419.2014.990592.
9. *Gourrion J., Vandemark D., Bailey S., Chapron B., Gommenginger G.P., Challenor P.G., Srokosz M.A.* A two parameter wind speed algorithm for ku-band altimeters // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, vol. 19, iss.12, p. 2030–2048. — DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<2030:ATPWSA>2.0.CO;2.
10. *Hasselmann D.E., Dunckel M., Ewing J.A.* Directional wave spectra observed during JONSWAP 1973 // Journal of Physical Oceanography, 1980, vol. 10, iss. 8, p. 1264–1280. — DOI:10.1175/1520-0485(1980)010<1264:DWSODJ>2.0.CO;2.
11. *Holthuijsen Leo H.* Waves in oceanic and coastal waters. — United Kingdom, Cambridge University Press, 2010.
12. *Karaev V.Yu. et al.* The concept of a microwave radar with an asymmetric knifelike beam for the remote sensing of ocean waves // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, vol. 22, iss. 11, p. 1809–1820.
13. *Kitaigorodskii S.A.* Applications of the theory of similarity to the analysis of wind generated wave motion as a stochastic process // Izv. Akad. Nauk, SSSR. Ser. Geofiz., 1962, (1), p. 105–117.
14. *Kudryavtsev V., Golubkin P., Chapron B.* A simplified wave enhancement criterion for moving extreme events // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, vol. 120, iss. 11, p. 7538–7558. — DOI:10.1002/2015JC011284.
15. *Maat N., Kraan C., Oost W.A.* The roughness of wind waves // Boundary-Layer Meteorology, 1991, vol. 54 , iss. 1, p. 89–103.
16. *Mitsuyasu H., Nakamura R., Komori T.* Observations of the wind and waves in Nakata Bay, Report of the Research Inst // Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 1971, vol. 19, p. 37–74.
17. *Pierson W.J., Moskowitz L.* A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii // Journal of Geophysical Research, 1964, vol. 69, iss. 24, p. 5181–5190. — DOI:10.1029/JZ069i024p05181.
18. *Tan Delin, Chen Zheng.* On A General Formula of Fourth Order Runge-Kutta Method // Journal of Mathematical Science & Mathematics Education, 2012, vol. 7, p. 1–10.
19. *Thoppil P.G., Hogan P.J.* Persian Gulf response to a wintertime shamal wind event // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2010, vol. 57(8), p. 946–55. — DOI:10.1016/j.dsr.2010.03.002.
20. *Tomczak M., Godfrey J.S.* Regional Oceanography: an Introduction, 2nd edition. — Oxford, U.K., Elsevier Science Ltd., 2003. — 391 p.
21. *Young I.R.* Wind generated ocean waves. Vol. 2. — New York, 1999. — 307 p.
22. *Zakharov V.E.* Theoretical interpretation of fetch limited wind-driven sea observations // Nonlinear Processes in Geophysics, 2005, vol. 12, iss. 6, p. 1011–1020. — DOI:10.5194/npg-12-1011-2005.

О.В. Шатрова, Т.Р. Ерёмина, Е.К. Ланге

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭВТРОФИРОВАНИЯ В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

O.V. Shatrova, T.R. Eremina, E.K. Lange

VARIABILITY OF PARAMETERS OF EUTROPHICATION IN THE GULF OF FINLAND BASED ON FIELD OBSERVATIONS

Работа посвящена актуальной теме современной морской экологии — проблеме функционирования уникальных природных образований: эстуарных зон морских экосистем, находящихся под прессом хозяйственной деятельности человека. В основу работы положен обширный материал (более 600 измерений) натурных исследований, проведенных РГГМУ в течение 2001–2011 гг. в эстуарии р. Невы — восточной части Финского залива Балтийского моря, одной из важнейших проблем которого является эвтрофикация антропогенного генезиса.

Ключевые слова: показатели эвтрофирования, эстуарная зона, восточная часть Финского залива, биогенные элементы.

The work is dedicated to the actual topic of modern marine ecology — the problem of functioning of the unique natural formations: the estuarine zones of marine ecosystems under the pressure of human activities. The work is based on the extensive material (over 600 measurements) of the studies conducted by RSHU during 2001–2011 in the Neva River estuary — the eastern part of the Gulf of Finland, one of the major problems which is the eutrophication of anthropogenic origin.

Keywords: estuary area, indicators of eutrophication, long-term variability, the eastern part of the Gulf of Finland, hypoxic zones, nutrients.

Экологическое состояние большинства участков акватории Балтийского моря не соответствует стандартам качества окружающей среды, установленным правительствами стран и международными институтами. Причины создавшейся неудовлетворительной ситуации кроются среди нескольких факторов, таких как эксплуатация природных ресурсов (например, рыболовство), загрязнение окружающей среды (выбросы биогенных элементов и вредных веществ), физическая модификация среды обитания, вселение чужеродных видов и изменение климата.

Загрязнение излишними биогенными элементами (в основном соединениями азота и фосфора) — то есть обогащение морской среды питательными веществами — вызывает особую озабоченность. Финский залив является одним из наиболее эвтрофированных районов Балтийского моря [13].

Восточная часть Финского залива является одним из районов Балтики, испытывающих интенсивную техногенную нагрузку. На его берегах находится крупнейший для региона Санкт-Петербургский промышленно-территориальный комплекс.

В середине 90-х гг. прошлого столетия вследствие спада в промышленном и сельскохозяйственном производстве произошло некоторое уменьшение нагрузки

загрязняющими веществами и улучшение состояния экосистемы восточной части Финского залива. Однако с началом подъема производства, строительства портов нагрузка загрязняющими веществами снова возросла. Это негативно сказывается на состоянии экосистемы Финского залива.

Основной целью исследования является оценка изменения показателей эвтрофирования в Финском заливе на основе современных данных натурных наблюдений.

Особенности эвтрофикации Финского залива

Под эвтрофикацией обычно понимают повышение степени трофности (кормности) водоема, которое выражается в его обогащении органическим веществом и минеральными соединениями биогенных элементов и часто, в особенности на начальных этапах эвтрофирования, связано с увеличением биологической продуктивности водоема. Одним из основных симптомов эвтрофикации является увеличение концентрации биогенных элементов (азота и фосфора) в воде и донных отложениях [9].

Загрязнение водоемов излишними биогенными элементами повышает уровень первичной продукции: в эвтрофных водоемах возникает массовое развитие микроскопических водорослей и наблюдается «цветение» воды. Увеличение количества микроскопических водорослей уменьшает прозрачность воды. Типичное явление в высокопродуктивных водоемах — «цветение» сине-зеленых водорослей, многие виды которых являются потенциально токсичными. Эвтрофикация существенно ухудшает состояние среды обитания многих ценных пород рыб.

Повышение продуктивности водоемов увеличивает потребление кислорода на разложение органического вещества, что ведет к уменьшению содержания кислорода в воде, особенно в придонных слоях воды и/или в зимнее время. Отсутствие растворенного кислорода и образование сульфида водорода (H_2S) приводят к возникновению заморов в придонных слоях. Отсутствие кислорода вызывает активное поступление фосфора из донных отложений в воду и усиливает процесс эвтрофикации [11].

В Балтийском море основные признаки эвтрофирования были выявлены раньше, чем на других морских акваториях [2]. Однако проблема выявления причин эвтрофикации Балтики и определения соотношения между природными и антропогенными составляющими весьма сложна и до сих пор остается дискуссионной. Сложность ее решения обусловлена специфическими физико-географическими особенностями моря, приводящими к тому, что существенное значение во многих проявлениях эвтрофирования могут иметь чисто природные процессы и факторы [2]. Движущие силы, механизмы и проявления эвтрофикации в Балтийском море имеют ряд особенностей, которые можно обобщить следующим образом:

- мелководные пороги ослабляют водообмен с Северным морем и между основными бассейнами (заливами) Балтики;
- положительный водный баланс и эстуарийный тип циркуляции вод поддерживают постоянную стратификацию вод, ослабляющую вертикальный обмен;
- пониженный водообмен и долговременные тенденции природных и антропогенных воздействий определяют медленную реакцию моря на их изменения, занимающую годы и десятилетия;

- значительная долготная протяженность моря и градиенты климатических и социо-экономических условий на его водосборе приводят к существенным меридиональным градиентам в динамике экосистем и лимитирующих первичную продукцию факторов;
- глубинные слои моря спорадически подвержены возникновению бескислородных условий, частота, распространение и продолжительность которых определяются динамическим балансом между вентиляцией глубинных слоев затоками североморских вод и биохимическим потреблением кислорода на окисление органического вещества;
- изменения окислительно-восстановительных условий в глубинных слоях кардинально меняют круговорот биогенов — сероводородные зоны лишены нитратов и обогащены аммонием и фосфатами;
- азотфиксирущие сине-зеленые водоросли способны служить источником азота для системы, сопоставимым по величине с поступлением с суши и через атмосферу;
- эвтрофикация прибрежных вод, особенно на открытых побережьях, в сильнейшей степени определяется концентрациями биогенов в открытом море [8].

Особенно чувствительными к возрастающему поступлению минеральных и органических форм биогенных элементов оказываются эстуарии, нагрузка на которые формируется не только в прибрежной полосе, но и на гораздо больших площадях водосборных бассейнов. Финский залив во многих отношениях напоминает огромный бесприливной эстуарий. Учитывая то, что на его водосборном бассейне расположены густонаселенные страны с высокоразвитой промышленностью, интенсивным сельским и лесным хозяйством, естественно ожидать, что Финский залив потенциально должен быть в большей степени подвержен эвтрофированию, чем многие другие водные объекты [12].

Анализ временной изменчивости характеристик морской среды

В июле–августе 2001–2011 гг., в период комплексных исследований РГГМУ в Восточной части Финского залива, было произведено 666 измерений в фотическом и придонном слое (~40 м) в мелководном (I) и глубоководном (II) районах гидрофизических характеристик: температуры, солености; гидрохимических характеристик: растворенного кислорода, фосфора-фосфатов, азота (нитритов + нитратов); гидробиологических характеристик: хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона. Каждый год измерения выполнялись на станциях постоянного мониторинга, однако количество станций в различные годы отличалось (табл. 1).

Для анализа выделены фотический и придонный слои. Для этих слоев выполнен статистический анализ [10] вышеперечисленных характеристик.

Температура воды. Период наблюдений (конец июля — начало августа) является временем, когда имеет место максимальный прогрев, и температура воды на поверхности достигает максимальных значений. При этом пространственное распределение средней за период 2001–2011 гг. поверхностной температуры в открытой части залива было более однородным (рис. 1, *б*), чем в прибрежных районах. В среднем за период температура на поверхности в восточной части Финского залива составляла 19,8 °С (рис. 1, *а*).

Таблица 1

Количество измерений гидрофизических и гидрохимических характеристик по годам, районам (I — мелководный, II — глубоководный) и слоям (s — фотический, b — придонный)

Период измерения	2001 г.					2002 г.					2003 г.					2004 г.					2005 г.					2006 г.				
Место измерения	район		слой		Всего	район		слой		Всего	район		слой		Всего	район		слой		Всего	район		слой		Всего	район		слой		Всего
Характеристика	I	II	s	b		I	II	s	b		I	II	s	b		I	II	s	b		I	II	s	b		I	II	s	b	
Температура	20	12	16	16	*32*	28	20	24	24	*48*	22	18	20	20	*40*	36	28	32	32	*64*	45	28	37	36	*73*	49	34	42	41	*83*
Соленость	20	12	16	16	*32*	28	20	24	24	*48*	22	18	20	20	*40*	36	28	32	32	*64*	46	28	37	37	*74*	50	34	42	42	*84*
Фосфаты	11	6	8	9	*17*	25	16	17	24	*41*	20	9	10	19	*29*	32	20	26	26	*52*	37	22	27	32	*59*	42	15	28	29	*57*
Нитраты	18	7	13	12	*25*	22	12	17	17	*34*	21	15	19	17	*36*	33	20	27	26	*53*	33	12	21	24	*45*	20	10	15	15	*30*
Водородный показатель	20	12	16	16	*32*	28	20	24	24	*48*	22	18	20	20	*40*	36	28	32	32	*64*	46	28	37	37	*74*	0	0	0	0	*0*
Щелочность	0	0	0	0	*0*	28	20	24	24	*48*	0	0	0	0	*0*	34	28	31	31	*62*	42	25	34	33	*67*	23	14	19	18	*37*
Растворенный кислород	19	12	16	15	*31*	28	19	24	23	*47*	21	17	18	20	*38*	35	28	31	32	*63*	44	28	35	37	*72*	50	32	41	41	*82*
Прозрачность	4	2	6	0	*6*	8	6	14	0	*14*	7	9	16	0	*16*	10	5	15	0	*15*	10	3	13	0	*13*	11	5	16	0	*16*
Хлорофилл «а»	4	1	5	0	*5*	0	0	0	0	*0*	8	8	16	0	*16*	9	5	14	0	*14*	10	4	14	0	*14*	11	5	16	0	*16*
Биомасса фитопланктона	4	2	6	0	*6*	7	3	10	0	*10*	7	8	15	0	*15*	9	5	14	0	*14*	11	4	15	0	*15*	12	5	17	0	*17*

Период измерения	2007 г.					2008 г.					2009 г.					2010 г.					2011 г.					ВСЕГО
Место измерения	район		слой		Всего	район		слой		Всего	район		слой		Всего	район		слой		Всего	район		слой		Всего	
Характеристика	I	II	s	b		I	II	s	b		I	II	s	b		I	II	s	b		I	II	s	b		
Температура	48	32	40	40	*80*	18	8	13	13	*26*	50	20	35	35	*70*	48	24	36	36	*72*	47	24	36	35	*71*	659
Соленость	48	32	40	40	*80*	18	8	13	13	*26*	50	20	35	35	*70*	48	24	36	36	*72*	48	24	36	36	*72*	662
Фосфаты	45	30	37	38	*75*	18	8	13	13	*26*	47	16	31	32	*63*	48	26	37	37	*74*	44	20	31	33	*64*	557
Нитраты	36	24	30	30	*60*	18	8	13	13	*26*	46	16	31	31	*62*	48	24	36	36	*72*	46	20	33	33	*66*	509
Водородный показатель	48	32	40	40	*80*	20	8	14	14	*28*	50	20	35	35	*70*	48	24	36	36	*72*	48	24	36	36	*72*	580
Щелочность	12	10	11	11	*22*	20	8	14	14	*28*	50	20	35	35	*70*	48	24	36	36	*72*	48	24	36	36	*72*	478
Растворенный кислород	48	32	40	40	*80*	20	8	14	14	*28*	50	20	35	35	*70*	48	24	36	36	*72*	48	24	36	36	*72*	655
Прозрачность	9	6	15	0	*15*	9	4	13	0	*13*	24	8	32	0	*32*	15	4	19	0	*19*	10	4	14	0	*14*	173
Хлорофилл а	12	6	18	0	*18*	9	4	13	0	*13*	17	5	22	0	*22*	15	5	20	0	*20*	11	4	15	0	*15*	153
Биомасса фитопланктона	11	7	18	0	*18*	9	4	13	0	*13*	16	6	22	0	*22*	15	5	20	0	*20*	10	4	14	0	*14*	164
Всего измерений за 11 лет																										4590

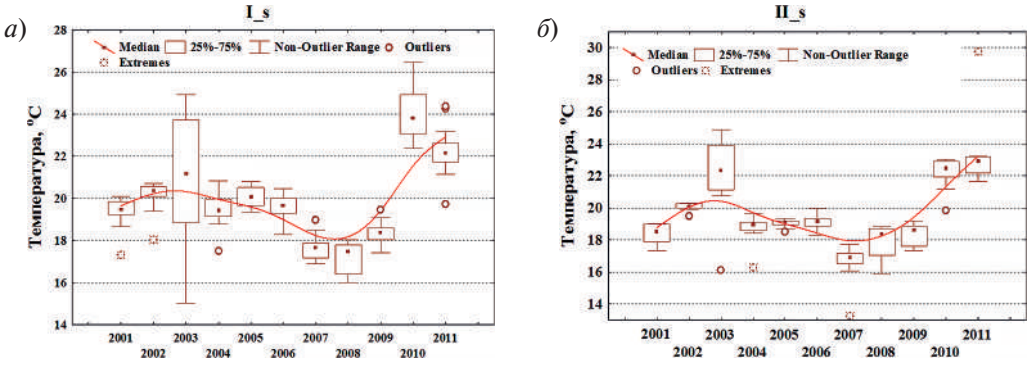


Рис. 1. Температура воды (°С) в восточной части Финского залива в фотическом слое в период 2001–2011 гг.: *а* — в I районе; *б* — во II районе

Средние значения придонной температуры изменялись от 4,7 °С в мелководном (рис. 2, *а*) районе и до 3,6 °С в глубоководном (рис. 2, *б*).

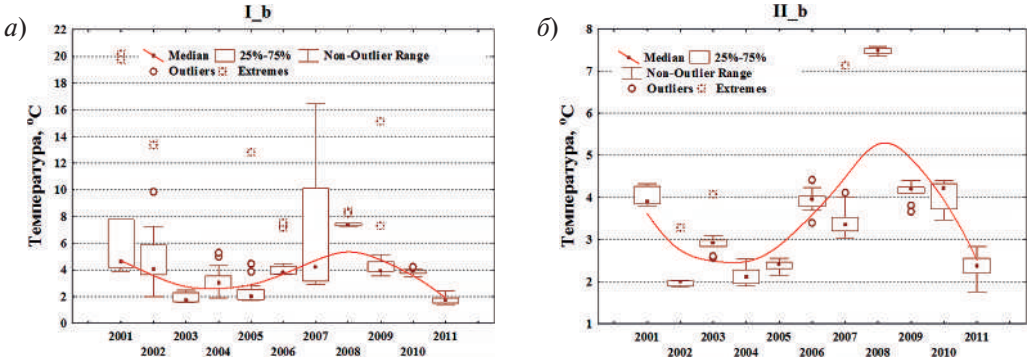


Рис. 2. Температура воды (°С) в восточной части Финского залива в придонном слое в период 2001–2011 гг.: *а* — в I районе; *б* — во II районе

Для 2003 г. было характерно явление четко выраженного «подпора» глубинных вод, и поэтому этот год в этом смысле можно считать аномальным. 2003 г., как известно, характеризуется также затоком североморских вод в Балтийское море, и возможно, что указанная аномалия в какой-то мере является следствием этого затока, проявившимся в восточной части Финского залива [1].

Самыми холодными являлись 2007–2008 гг., когда в летний период минимальные значения температуры в фотическом слое составляли 16–17,3 °С. 2010 г. был аномально жарким, значения температуры достигали 22–24 °С.

Изменчивость придонных температур (рис. 2) имела противоположную тенденцию. С 2001 по 2004 г. температура воды снижалась, затем последующие 4 года повышалась и снова уменьшалась.

На основе данных наблюдений была исследована изменчивость температуры воды в холодном промежуточном слое (ХПС) (рис. 3). Холодный промежуточный слой Балтийского моря — это сезонное явление; он отчетливо выделяется со своей аномально низкой температурой на глубинах 40–60 м в теплое время года в глубоководных районах моря. Во временном ходе температуры воды в ХПС четко прослеживается тенденция роста, начиная с 2002 г., сменившаяся резким понижением температуры в связи с холодными зимами 2010–2011 гг.

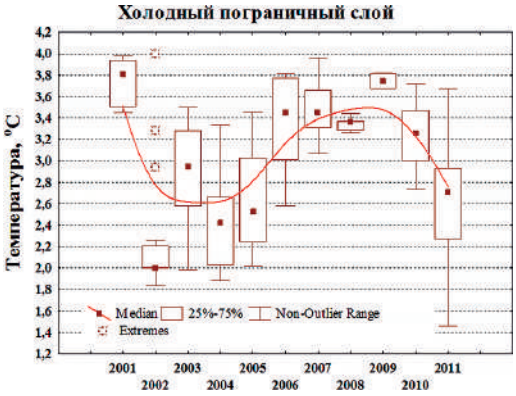


Рис. 3. ХПС (°C) в восточной части Финского залива на станциях 26F–29F, 34F–36F, 4UGMS в период 2001–2011 гг.

Солёность. Пространственное распределение солёности на поверхности восточной части Финского залива меняется от года к году гораздо менее заметно, чем температура. Наиболее заметным является осолонение воды в 2003 г., связанное с затоком североморских вод.

В мелководном районе значения солёности меньше, нежели в глубоководном, что объясняется распреснением за счет впадающих рек. В придонном слое осредненная за период 2001–2011 гг. солёность увеличивается в западном направлении от 5,3 до 6,4 ‰. В более глубокой западной части акватории прослеживался проникновение вод с солёностью свыше 7 ‰, что находится в соответствии с явлением «подпора». Можно сказать, что это явление оказывает влияние на общий фон солёности в большей части рассматриваемой акватории Финского залива, приводя к его повышению на глубинах, а также на поверхности на участках, подверженных воздействию апвеллинга [3].

Прозрачность. Показатель прозрачности воды непосредственно связан с процессами эвтрофирования водоемов, так как в результате этих процессов за счет развития фитопланктона происходит увеличение содержания в воде взвешенных веществ, в том числе и хлорофилла, и, как следствие, уменьшение прозрачности воды. В период с 2001 по 2011 г. прозрачность воды по диску Секки закономерно увеличивалась от Невской губы к внешнему глубоководному району, в среднем изменяясь от 1,3 до 5,6 м. Однако четко выраженной тенденции изменения прозрачности за период исследований не выявлено.

Содержание растворенного кислорода. Межгодовая изменчивость концентраций растворенного кислорода на поверхности в мелководном районе незначительна. В глубоководном она растет до 2006 г., а затем плавно понижается.

В придонном слое концентрация кислорода меняется незначительно в пределах 4–5 мл/л до 2008 г., затем наблюдается обширная гипоксия до 1,9 мл/л в 2010 г., что обусловлено аномальными гидрометеорологическими условиями 2010 г.: жарким летом и суровой зимой (рис. 4, *а*, *б*).

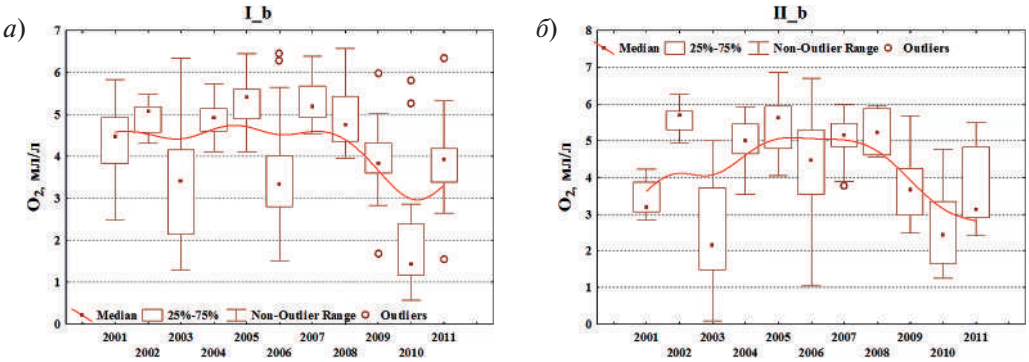


Рис. 4. Растворенный кислород (мл/л) в придонном слое в восточной части Финского залива в период 2001–2011 гг.: *а* — в I районе; *б* — во II районе

Наблюдающийся во второй половине периода наблюдений максимальный прогрев обусловливает уменьшение концентрации кислорода.

Для вертикального распределения абсолютного и относительного содержания кислорода во второй половине лета 2003 г. характерно распространение зоны дефицита кислорода с запада на восток, причиной которому явилось значительное по пространству вторжение придонных вод из открытой западной части залива, обусловленное интенсивным затоком североморских вод в Балтику. Последствием этих процессов явилось заполнение придонных горизонтов района I водой с повышенной солёностью и с низкой — менее 3–4 мл/л концентрацией кислорода.

Биогенные элементы. Пространственное изменение фосфатов на поверхности за исследуемый период достаточно незначительно и колеблется от 0 до 10 мкг/л (рис. 5, *а*, *б*). В придонном слое их содержание увеличивается от мелководной к глубоководной части Финского залива и составляет в среднем от 54 до 86 мкг/л (рис. 6, *а*, *б*).

Несмотря на снижение фосфорных нагрузок в 1,25 раза, начиная с 2005 г., по данным ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» [5], в фотическом слое наблюдается хорошо выраженная тенденция на увеличение концентрации фосфатов, что свидетельствует о значительном вкладе внутриводоемных процессов в биогеохимический круговорот фосфора в восточной части Финского залива.

В придонном слое происходит накопление фосфатов. Интенсивность этого процесса зависит главным образом от степени развития стратификации вод и кислородных условий у дна. В придонном слое локальный минимум отмечался в 2007–2008 гг., что

объясняется высоким содержанием растворенного кислорода у дна (см. рис. 6). Кроме того, на режим фосфатов придонного слоя оказывают влияние затоки вод повышенной солёности из открытой части залива. Такая ситуация, например, наблюдалась в августе 2003 г., когда концентрация фосфатов во внутреннем эстуарии превышала среднемноголетнюю более чем в 2,5 раза [6].

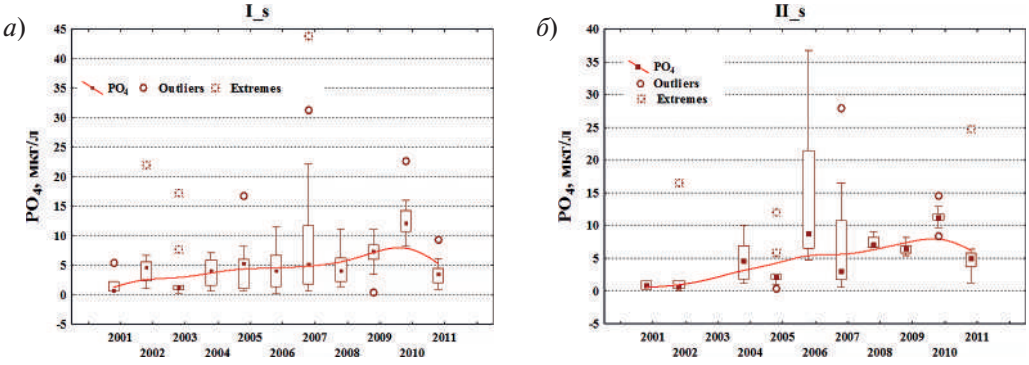


Рис. 5. Фосфаты (мкг/л) в фотическом слое в восточной части Финского залива в период 2001–2011 гг.: *а* — в I районе; *б* — во II районе

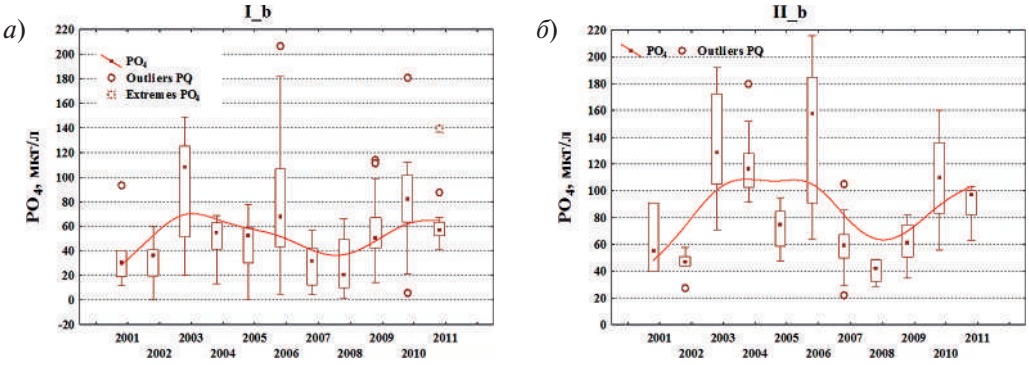


Рис. 6. Фосфаты (мкг/л) в придонном слое в восточной части Финского залива в период 2001–2011 гг.: *а* — в I районе; *б* — во II районе

Таким образом, в придонном слое межгодовая изменчивость концентраций фосфатов весьма значительна по сравнению с изменчивостью в поверхностном слое.

Азот является элементом, лимитирующим первичную продукцию в открытом районе (II) восточной части Финского залива. Поэтому содержание нитритов и нитратов на поверхности незначительно. Среднемноголетние концентрации на поверхности изменяются в узком диапазоне значений: от 5,9 до 12,0 мкг/л. Максимальная концентрация азота за период осреднения отмечалась в 2009 г. в обоих районах (рис. 7, *а*, *б*).

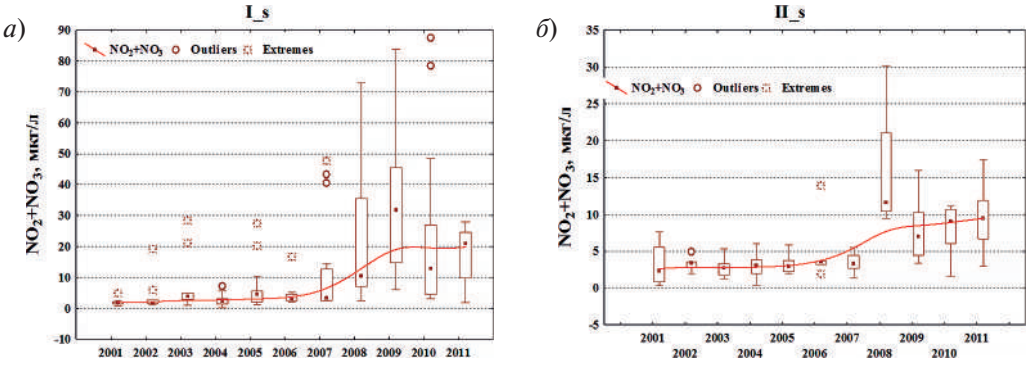


Рис. 7. Нитраты (мкг/л) в фотическом слое в восточной части Финского залива в период 2001–2011 гг.: *а* — в I районе; *б* — во II районе

В придонных слоях происходит накопление обеих форм минерального азота. На графике многолетнего распределения на придонном горизонте довольно четко выделяется область максимальных концентраций азота в 2009 г. Максимальные концентрации в придонном слое составляют 242,2–275,5 мкг/л (рис. 8, *а*, *б*).

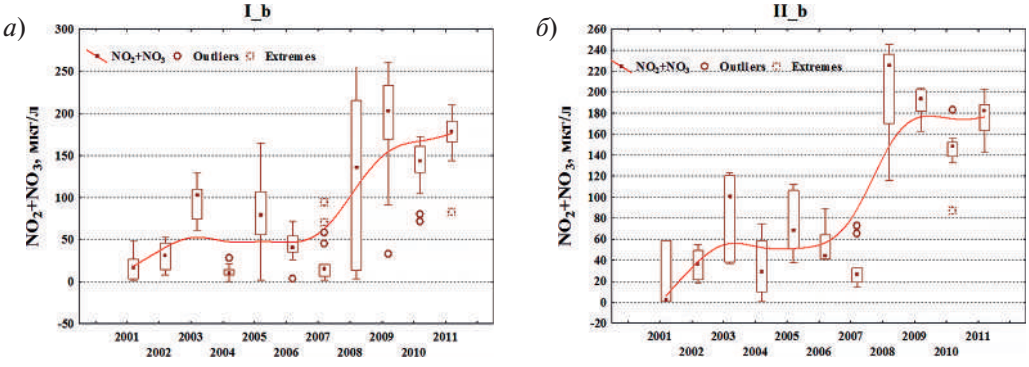


Рис. 8. Нитраты (мкг/л) в придонном слое в восточной части Финского залива в период 2001–2011 гг.: *а* — в I районе; *б* — во II районе

Заток придонных вод из открытой части залива в августе 2003 г. привел к увеличению концентрации этих минеральных форм азота под галоклином.

Хлорофилл «а». Содержание фотосинтетических пигментов является важным показателем эвтрофированности водоема и тесно связано с прозрачностью воды. Наибольшие величины концентраций хлорофилла «а» в верхнем перемешанном слое наблюдались в мелководном районе, где они достигали в среднем 6,6 мкг/л, в 2004 г. его содержание составляло в среднем 12 мкг/л (рис. 9, *а*). В глубоководном районе среднее содержание хлорофилла «а» составляло 3,12 мкг/л, а в 2004 г. — в среднем 5,5 мкг/л (рис. 9, *б*).

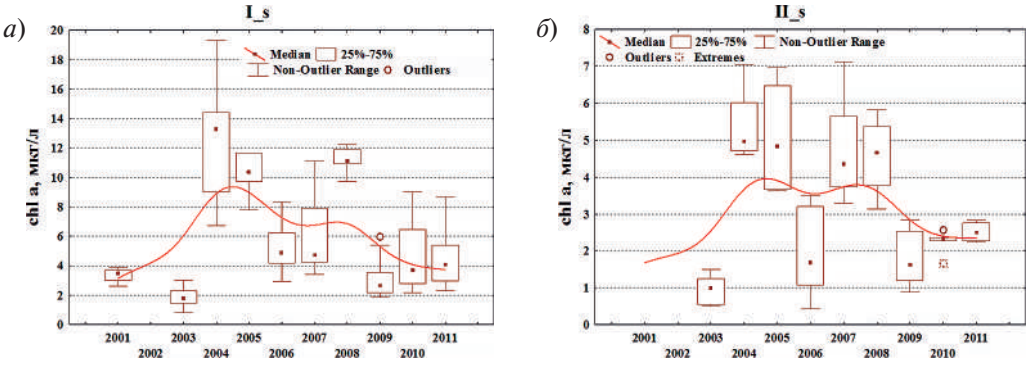


Рис. 9. Хлорофилл «а» (мкг/л) в восточной части Финского залива в период 2001–2011 гг.: *а* — в I районе; *б* — во II районе

Значительное уменьшение интенсивности фотосинтеза от Невской губы в направлении глубоководного района связано с эстуарными эффектами, одним из вероятных проявлений которых является увеличение солёности, что приводит к снижению видового разнообразия пресноводных зеленых и сине-зеленых водорослей и уменьшению содержания хлорофилла «а» [14].

Биомасса фитопланктона. На графиках межгодовой изменчивости биомассы фитопланктона четко прослеживается тенденция на уменьшение с 2005 г., что обусловлено увеличением в этот же период фосфатов и азота (рис. 10, *а*, *б*).

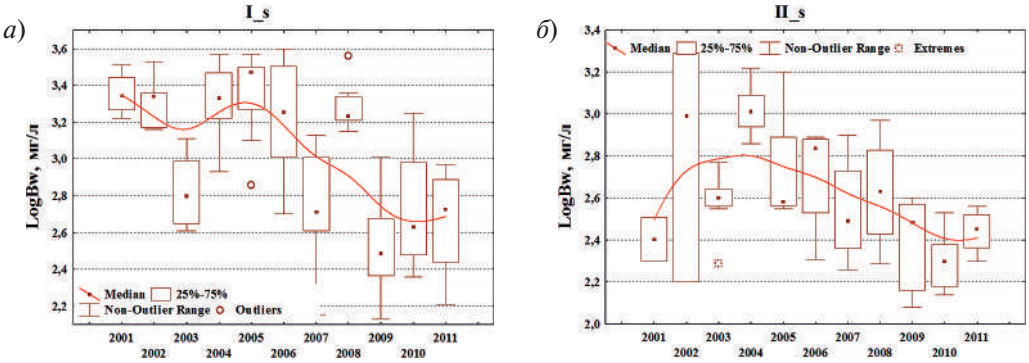


Рис. 10. Биомасса фитопланктона (мг/л) в восточной части Финского залива в период 2001–2011 гг.: *а* — в I районе; *б* — во II районе

Максимальные значения относятся к 2005 г., когда в мелководном районе биомасса составляла 3,37 мг/л, а в глубоководном — 2,73 мг/л. Минимальные значения отмечаются в 2010 г., когда отмечались аномально высокие температуры, минимальная солёность, происходило понижение содержания растворенного кислорода и увеличение биогенных элементов.

Заключение

Проведенный анализ показал, что после 2007 г. в экосистеме Финского залива произошли заметные изменения, которые выражаются в значительном снижении биомассы фитопланктона, с одной стороны, а с другой стороны — в повышении содержания биогенных элементов как в фотическом, так и в придонном слоях. Увеличение содержания нитритного азота в придонных водах служит дополнительным подтверждением, что в экосистеме происходят серьезные изменения.

На фоне снижения фосфорных и азотных нагрузок с суши, биомасса фитопланктона и концентрация хлорофилла «а» уменьшаются, а концентрация биогенных элементов растет. Согласно результатам проведенного корреляционного анализа наибольший вклад в уменьшение биомассы фитопланктона вносит распреснение исследуемой акватории. Вместе с тем, могут быть и иные факторы, приводящие к заметным изменениям в экосистеме залива, такие как изменение климата [4] и воздействие видов-вселенцев [7].

Таким образом, при разработке рекомендаций по улучшению экологического состояния залива необходимо учитывать влияние климатических и биотических факторов.

Литература

1. *Аверкиев А.С., Ерёмина Т.Р., Исаев А.В.* Влияние затока Североморских вод на экосистему Финского залива // Сб. мат. конф. «Аква-терра–2004». — СПб., 2004. — С. 141–145.
2. *Герлах С.А.* Загрязнение морей: диагноз и терапия. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 263 с.
3. *Ерёмина Т.Р., Исаев А.В.* Анализ изменчивости гидрофизических и гидрохимических показателей в восточной части Финского залива // Мат. итог. сес. уч. сов. РГГМУ. — СПб., 2004. — С. 34–36.
4. *Ерёмина Т.Р., Исаев А.В., Рябченко В.А.* Оценка и прогноз тенденций в эволюции экосистемы восточной части Финского залива при различных сценариях изменения биогенной нагрузки в будущем климате // Учен. зап. РГГМУ. 2014. № 36. — С. 118–127.
5. *Защита* Балтийского моря [Электронный ресурс]. — URL: http://www.vodokanal.spb.ru/kanalizovanie/ekologiya_baltijskogo_morya (дата обращения: 12.07.2016).
6. *Исаев А.В.* Количественные оценки пространственно-временной изменчивости абиотических характеристик экосистемы восточной части Финского залива на основе данных наблюдений и математического моделирования: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — СПб., 2010. — С. 21.
7. *Максимов А.А., Ерёмина Т.Р., Ланге Е.К. и др.* Режимная перестройка экосистемы восточной части Финского залива вследствие инвазии полихет Marenzelleria arctia // Океанология. 2014. Т. 54. № 1. — С. 52–59.
8. *Савчук О.П.* Исследования эвтрофикации Балтийского моря // Труды ГОИН. 2005. Т. 209. — С. 272–285.
9. *Терзиев Ф.С., Рожков В.А., Смирнова А.И.* Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. III. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1992.
10. *Халафян А.А.* STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд.: учебник. — М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. — 512 с.
11. *Эвтрофикация*: Информационный бюллетень [Электронный ресурс]. — URL: http://www.prestobalticsea.eu (дата обращения: 14.11.2015).

12. *Андерсен Э.Х., Паулак Дж.* Биогенные вещества и эвтрофикация в Балтийском море: причины, последствия, решения [Электронный ресурс] // Парламентская конф. Балтийского моря: Отчет Совета Министров Северных стран. — Дания, Копенгаген. 2007. — URL: http://www.bspc.net/file/show/95 (дата обращения: 14.11.2015).
13. *Eutrophication* in the Baltic Sea — An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment and eutrophication in the Baltic Sea region // Baltic Sea Environment Proceedings No. 115B, HELCOM. — 148 p.
14. *Eremina T., Ershova A., Lange E.* Indicators of eutrophication in the eastern Gulf of Finland: long-term trends and variability // Abstract book of 10th Baltic Sea Science Congress. — Riga, Latvia. 2015. — P. 215.

Работа выполнена в рамках осуществления научной деятельности по базовой части государственного задания № 2014/166 Министерства образования и науки РФ.

В.Н. Боков, В.Н. Воробьев

ПРОГНОЗЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И АТМОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ

V.N. Bokov, V.N. Vorobyev

PREDICTIONS OF SEISMIC EVENTS USING GEOPHYSICAL AND ATMOSPHERIC PRECURSORS

В статье проведено сравнение характеристик геофизических и атмосферно-циркуляционных предвестников, используемых при прогнозе Великого японского землетрясения 11 марта 2011 г.

Ключевые слова: геофизический предвестник, атмосферно-циркуляционный предвестник, краткосрочный прогноз землетрясений, деформационные процессы, низкочастотный сейсмический шум.

The article describes a comparison of the characteristics of geophysical and atmospheric circulation precursors used in the prediction of Great Japan earthquake 11 of March 2011.

Keywords: geophysical harbinger, atmospheric circulation precursor, short-term earthquake prediction, deformation, low-frequency seismic noise.

Геофизические предвестники сейсмических событий различают на долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные [15]. Однако существует тенденция придавать среднесрочным предвестникам роль краткосрочных. В этих случаях ретроспективно приписывают дату случившегося мощного землетрясения среднесрочному прогнозу, хотя в прогнозе указывается заблаговременность во временном интервале от 6 и более месяцев. Часто это связано с тем, что краткосрочные предвестники землетрясений плохо определяются [15, 16].

Специалисты, создающие методы краткосрочных прогнозов, обычно абсолютизируют значимость отдельно взятого предвестника. Практическое применение, казалось бы, достоверного предвестника обычно заканчивалось превращением такого предвестника в «мерцающий призрак» [16]. Например, М.Г. Савин ссылается на свой горький опыт: «Четверть века назад был предложен новый электромагнитный предвестник землетрясений. Численное моделирование показало, что в очаге резко изменяются импедансы (аналоги сопротивления для волновых процессов) быстрых колебаний естественного электромагнитного поля Земли. Чем не прогностический признак? Я был уверен, что он гарантирует точный прогноз, тем более что корреляция аномального

поведения импедансов с сейсмической активностью на Камчатке была налицо. Со временем, однако, мой бесспорный признак перешел в разряд призраков» [16].

Специалисты утверждают, что все известные предвестники землетрясений появляются в результате воздействия на них деформационных процессов. В связи с этим можно предположить, что большинство зафиксированных предвестников землетрясений, за исключением деформации и наклонов земной коры, являются вторичными. Тем не менее дополнительная геофизическая информация является полезной в таком сложном процессе, как краткосрочный прогноз землетрясений.

Достаточно часто в качестве предвестника землетрясений пытаются использовать высокочастотный микросейсмический шум, который повсеместно наблюдается в земной коре и имеет много источников [8, 9, 11]. Сейсмоакустическая эмиссия возникает в твердых горных породах земной коры в основном из-за изменения их напряженного состояния, движения флюидов и прохождения волновых колебаний от сильных землетрясений, а также от воздействия штормов, гроз, водопадов, обвалов и оползней. Исследования последних лет показали, что в подавляющем числе случаев сейсмоакустическая эмиссия возникает в результате деформации земной поверхности под воздействием атмосферных вихрей, генерирующих волновые колебания [2, 5, 6, 11, 14].

В работах [10, 13] утверждается, что «последние исследования сейсмических шумов привели к осознанию того, что именно их статистические характеристики содержат в себе наиболее ценную прогностическую информацию». В соответствии с работами [10, 13] низкочастотный сейсмический шум позволяет осуществлять среднесрочный прогноз времени и места сильных землетрясений. Рассчитываемые статистики низкочастотного сейсмического шума имеют физические принципы [10, 13]. Кратко они заключаются в следующем. Предполагается консолидация малых блоков земной коры в структуру большого размера, формирующую очаг будущего землетрясения. При этом среднее значение обобщенного показателя Херста α и ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$ в случае возникновения землетрясения стремятся к низким значениям [10]. Однако низкие значения этих параметров могут быть обусловлены взаимными движениями неконсолидированных малых блоков земной коры [10]. Двойственность формирования низких величин среднего значения обобщенного показателя Херста α и ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$, вызывает неопределенность физического принципа составления прогностических оценок. Подчеркнем лишь то, что формирование низкочастотного сейсмического шума в большей мере, по нашему мнению, связано с деформацией земной коры под влиянием изменения атмосферной циркуляции [2, 4–7].

На примере землетрясения 11 марта 2011 г. у Японии ($M = 9{,}0$), приведшей к многочисленным жертвам, рассмотрим прогноз этой катастрофы по оценке повышенной корреляции свойств шумов геофизических полей при использовании данных GPS наблюдений [13] и атмосферно-циркуляционных предвестников [1–7].

Не останавливаясь на подробностях расчетов, выполняемых в работе [13], отметим лишь исходные данные и суть исследований. Рассматривались поля GPS-сигналов, зарегистрированных на Японских островах с 30 января по 26 марта 2011 г. сетью из 1203 стационарных станций. Временной интервал включал в себя чуть более 40 суток до мегаземлетрясения 11 марта 2011 г. и почти 16 суток после него. Зарегистрированные

сигналы представлялись в виде трехкомпонентных временных рядов с 30-минутным шагом по времени. Исследовались статистические свойства случайных флуктуаций GPS-сигналов после перехода к приращениям до и после сейсмической катастрофы. В качестве предвестника землетрясения использовались значения максимального нормированного собственного числа корреляционной матрицы размером 3×3 для главных компонент трех характеристик GPS-шума — μ_p. Данное число определяет меру синхронизации в пространстве вариаций главных компонент трех характеристик шума. Слева на рис. 1 представлена карта значений μ_p, построенная по данным до землетрясения, справа — после землетрясения.

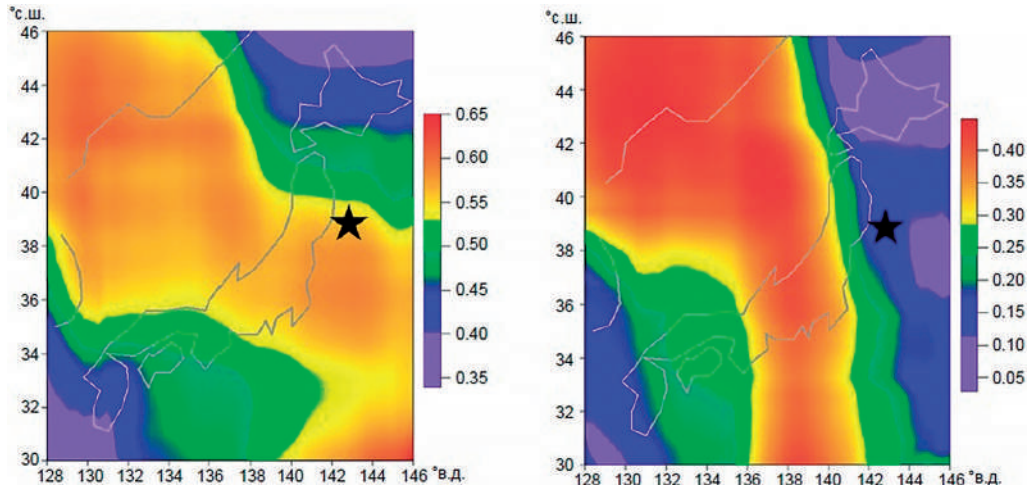


Рис. 1. Карты максимального нормированного собственного числа корреляционной матрицы размером 3×3 для главных компонент трех характеристик GPS шума. Оценка выполнена в скользящем прямоугольном пространственном окне конфигурации «центральная точка ±20 узлов» на регулярной сетке размера 50×50. Звездочка — местоположение эпицентра землетрясения

Выполненный авторами [13] анализ показал, что значения μ_p до землетрясения значительно превосходят их значения после события. Область максимальных значений μ_p до сейсмического события включает в себя эпицентр будущего землетрясения, тогда как после события в зоне вокруг эпицентра наблюдается слабая корреляция шумов.

Данный анализ легко выполнить, поскольку в ретроспективе известны координаты эпицентра. Отметим, что центр области максимальных значений μ_p находится на 250 км южнее от эпицентра, а вся область простирается на 500 км к югу и покрывает территорию Японии.

Области с максимальных значений μ_p также находятся и над Японским морем, поэтому точно определить координаты эпицентра данного землетрясения по данным значений максимальных значений μ_p практически очень сложно. Также сложно определить дату землетрясения, поскольку для расчетов необходимы временные представительные ряды в реальном режиме времени, что затрудняет определение даты катастроф. Тем более что ретроспективно выполненные исследования ориентированы

только на дату 11 марта, хотя сильное землетрясение произошло и 9 марта с $M = 7{,}2$ в эпицентре близком к эпицентру 11 марта.

Обратимся к анализу атмосферно-циркуляционных предвестников [3, 4] для рассматриваемых землетрясений и составленных краткосрочных прогнозов (с заблаговременностью за 2 суток). Подчеркнем, что в отличие от подхода статистической оценки GPS-шума мониторинг атмосферно-циркуляционных предвестников позволяет ежедневно оценивать вероятность сейсмического события в любой точке Земли. Это позволило определить высокую вероятность землетрясения 9 марта 2011 г. у Японии в эпицентре близком к эпицентру 11 марта. На рис. 2 представлены параметры данного землетрясения.

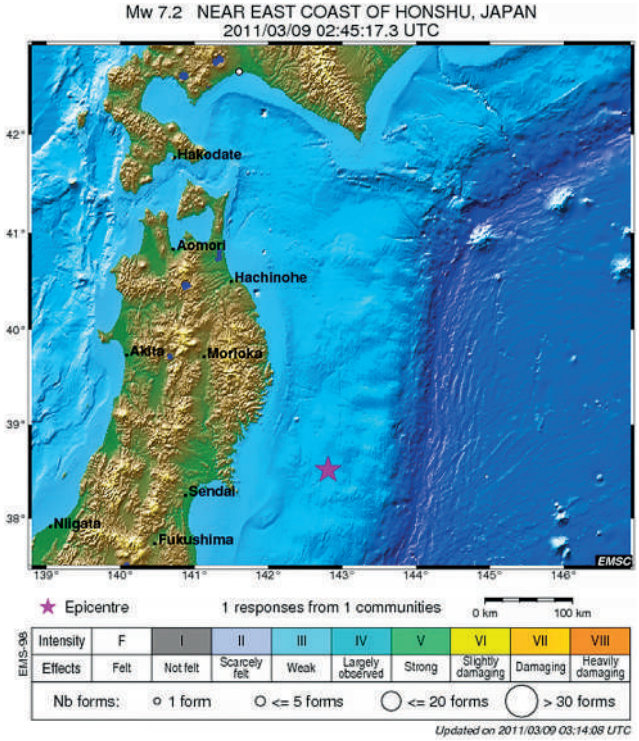


Рис. 2. Параметры сильного землетрясения 9 марта 2011 г.

Поле атмосферного давления представлено на рис. 3. Из рисунка видно, что местоположение эпицентра находится на периферии мощных атмосферных вихрей — антициклона и циклона. Пространственное распределение барических нагрузок отражено на рис. 4, значение изолинии «нулевой» деформации [2, 6] позволяет вывить местоположение эпицентра землетрясения. Обе карты входят в комплект данных атмосферно-циркуляционного предвестника, который позволил определить дату и место землетрясения 9 марта 2011 г.

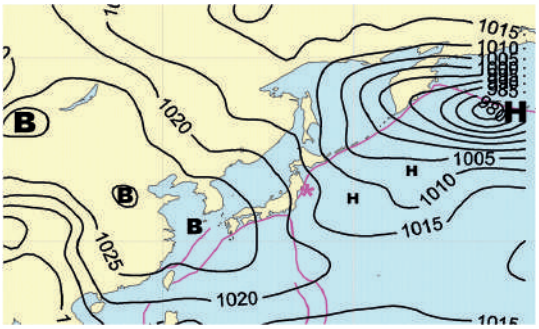


Рис. 3. Поле атмосферного давления на 9 марта 2011 г.

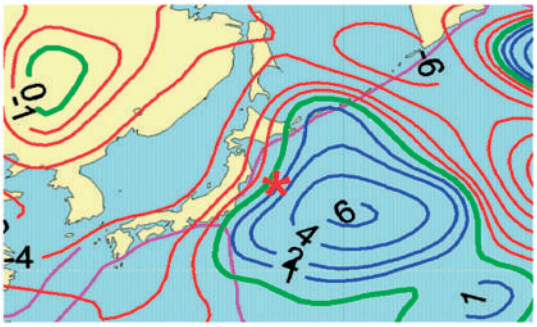


Рис. 4. Поле барической нагрузки на 9 марта 2011 г.
Эпицентр землетрясения отмечен звездочкой

Прогностическая карта на 9 марта 2011 г. для территории Северного полушария, на которой указан эпицентр у Японии, была выставлена в сеть Интернета 7 марта 2011 г. Копия этой карты представлена на рис. 5.

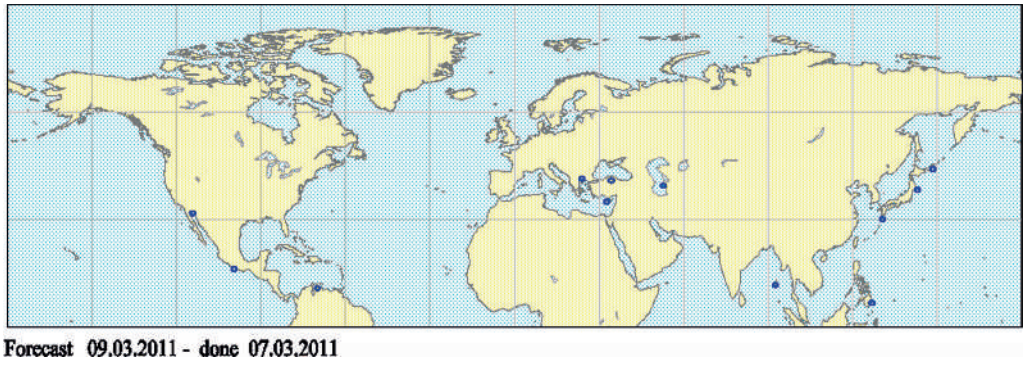


Рис. 5. Прогностическая карта землетрясений, составленная 7 марта 2011 г.

Аналогичный подход, но на основе другого атмосферно-циркуляционного предвестника, позволил спрогнозировать землетрясение 11 марта 2011 г. Поле атмосферного давления представлено на рис. 6. Из рисунка видно, что местоположение эпицентра находится уже не на периферии атмосферных вихрей, а ближе к центру антициклона. В целом поле пространственного распределения атмосферного давления уже другое. Пространственное распределение барических нагрузок отражено на рис. 7, которое также отличается от барического поля для 9 марта. Неизменным остается лишь то, что значение изолинии «нулевой» деформации указывает местоположение эпицентра землетрясения.

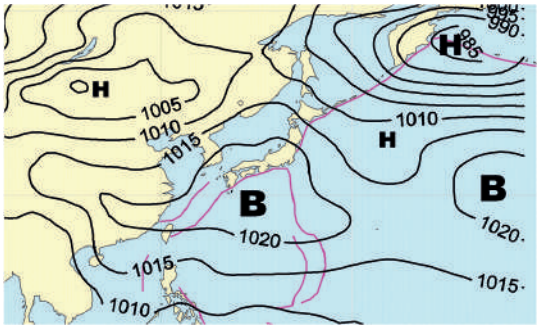


Рис. 6. Поле атмосферного давления на 11 марта 2011 г.

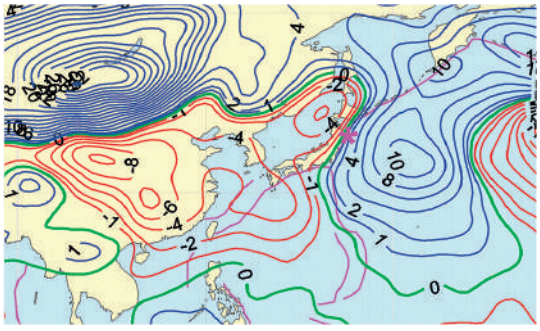


Рис. 7. Поле барической деформации на 11 марта 2011 г.
Эпицентр землетрясения отмечен звездочкой

Прогностическая карта на 11 марта 2011 г. для территории Северного полушария, на которой указан эпицентр у Японии, была выставлена в сеть Интернета 9 марта 2011 г. [4]. Копия этой карты представлена на рис. 8.

Для Японских островов в настоящее время составлен банк атмосферно-циркуляционных предвестников, включающий 332 случая землетрясений с магнитудой $\geqslant 6$. Это позволяет достаточно уверенно составлять краткосрочные прогнозы землетрясений с магнитудой $\geqslant 6$. Для достижения достаточной точности, для практики прогноза землетрясений, атмосферно-циркуляционные предвестники должны дополняться геофизическими предвестниками в целях оценки отклика изменений земной коры на атмосферные изменения.

Представленные выше исследования и расчеты позволяют сделать заключение о прогностической информативности сейсмических событий на примере повышенной корреляции свойств шумов геофизических полей при использовании данных GPS-наблюдений [13] и атмосферно-циркуляционных предвестников [1–7].

Выводы, которые были представлены в работе [13]: «Результаты многомерного анализа свойств шума GPS-сигналов подтверждают гипотезу о повышенной корреляции свойств шумов геофизических полей в области подготовки крупных землетрясений и могут быть использованы при поиске предвестников землетрясений по данным GPS наблюдений».

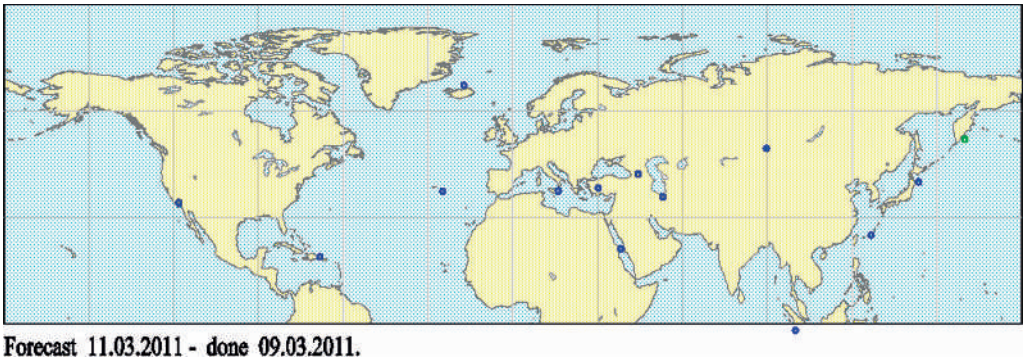


Рис. 8. Прогностическая карта землетрясений, составленная 11 марта 2011 г.

Данные выводы являются чрезмерно общими и не позволяют оценить координаты эпицентра землетрясения по данным значений максимальных значений μ_p, а также определить дату землетрясения. Существенно большей информативностью обладает подход, основанный на использовании атмосферно-циркуляционных предвестников. Представленные прогнозы, выполненные на основе атмосферно-циркуляционных предвестников, позволяют решить то, что не доступно выполнить по результатам многомерного анализа свойств шума GPS-сигналов. Во-первых, прогноз на основе атмосферно-циркуляционных предвестников действительно является краткосрочным, с заблаговременностью за 2 суток. Во-вторых, мониторинг изменения атмосферной циркуляции с большой достоверностью (75–80 %) позволяет определить дату землетрясения и координаты эпицентра. Сила землетрясений определяется несколько хуже — с достоверностью в 50 %, и это является предметом дальнейших исследований и усовершенствования сейсмо-синоптического метода [4]. Более точные краткосрочные прогнозы возможны при совместном использовании данных мониторинга геофизических предвестников и изменений атмосферной циркуляции.

Литература

1. *Боков В.Н.* Изменчивость атмосферной циркуляции — инициатор сильных землетрясений // Уральский геофиз. вестник. 2004. № 6. — С. 5–11.
2. *Боков В.Н.* Увеличение интенсивности проявления геофизических предвестников землетрясений под влиянием изменчивости атмосферного давления / Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле

Земли. Интерпретация геофизических полей // V Межд. конф. чтения Булашевича. — Екатеринбург: УрО РАН, 2009. — С. 46–50.
3. *Боков В.Н., Гутшабаш Е.Ш., Потиха Л.З.* Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 18. — С. 173–184.
4. *Боков В.Н.* Когда содрогнется Земля? Краткосрочные прогнозы землетрясений // Наука и Жизнь. 2011. № 9. — С. 47–57.
5. *Боков В.Н., Воробьев В.Н.* Воздействие атмосферной циркуляции на наклоны земной поверхности // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 27. — С. 94–99.
6. *Боков В.Н., Воробьев В.Н.* Изменчивость геоакустической эмиссии и изменения атмосферной циркуляции // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 32. — С. 43–54.
7. *Боков В.Н., Воробьев В.Н.* Мониторинг геофизических предвестников и прогноз землетрясений // Учен. зап. РГГМУ. 2014. № 36. — С. 128–137.
8. *Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В.* Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. № 1. — С. 52–67.
9. *Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В. и др.* Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений // Докл. РАН. 2006. Т. 407. № 5. — С. 669–672.
10. *Копылова Г.Н., Любушин А.А., Касимова В.А., Таранова Л.Н.* О разработке новой технологии оценки сейсмической опасности на основе прогностических свойств поля низкочастотных сейсмических шумов (На примере Камчатки) // Сб. мат-лов Всеросс. конф. с междун. участием «Геодинамич. процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска». — С. 115–119.
11. *Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М.* Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. — С. 45–59.
12. *Латынина Л.А., Васильев И.М.* Деформация земной коры под влиянием атмосферного давления // Физика Земли. 2001. № 5. — С. 45–54.
13. *Любушин А.А., Яковлев П.В., Родионов Е.А.* Многомерный анализ параметров флуктуаций GPS сигналов до и после мегаземлетрясения 11 марта 2011 г. в Японии // Геофиз. исслед. 2015. Т. 16. № 1. — С. 14–23.
14. *Перцев Б.П., Ковалева О.В.* Оценка влияния колебаний атмосферного давления на наклоны и линейные деформации земной поверхности // Физика Земли. 2004. № 8. — С. 79–81.
15. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. — М.: Наука, 2003. — 270 с.
16. *Савин М.Г.* Лечу землетрясения. Услуги платные // Химия и жизнь. 2005. № 11. — С. 8–13.

Авторы выражают свою искреннюю благодарность О.В. Бенкендорф за помощь в подготовке статьи.

А.Л. Кондове

СРАВНЕНИЕ СХЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРИЗАЦИЙ В МОДЕЛИ WRF

A.L. Kondowe

A COMPARISON OF PHYSICAL PARAMETERIZATION SCHEMES IN THE WRF MODEL

В статье рассматривается влияние схем параметризации физических процессов на качество гидродинамического прогноза метеорологических величин в восточной Африке. Моделирование происходит с помощью мезомасштабной гидродинамической модели WRF. Оценивается чувствительность качества прогноза к комбинации различных схем параметризации микрофизики облаков, конвективных процессов и пограничного слоя атмосферы. По результатам экспериментов сделан вывод о том, что основным процессом, определяющим наличие и интенсивность осадков, является конвекция и скрытые потоки тепла. Определен лучший набор параметризаций физических процессов для разных регионов восточной Африки.

Ключевые слова: гидродинамический прогноз, осадки, Восточная Африка, мезомасштабная гидродинамическая модель WRF.

This article examines the role of physical parameterization schemes on the quality of hydrodynamic forecast of meteorological variables in eastern Africa. Simulations were conducted using numerical mesoscale weather and research forecasting (WRF) model. Sensitivity of the combination of cloud microphysics, cumulus and planetary boundary layer parameterization schemes has been evaluated. Results of numerical experiments depicted that, convection and latent heat fluxes are the main factors determining the presence and intensity of precipitation. The best set of parameterization schemes of physical processes in different regions of east Africa has been determined.

Keywords: Numerical forecast, rainfall, eastern Africa, mesoscale numerical WRF model.

В последнее время для повышения точности прогноза погоды и климата используется ансамблевый подход. При создании ансамблей результатов моделирования и их интерпретации важную роль играет точность описания неадиабатических процессов (параметризации), происходящих в разных регионах земного шара в различные сезоны года.

Цель данного исследования — создание гидродинамической модели, позволяющей составить адекватный прогноз метеорологических величин и на ее основе составление схемы ансамблевого прогноза осадков, который очень сложен и актуален для Танзании. Важность качественного прогноза осадков связана с тем, что осадки в Восточной Африке (Танзания, Уганда, Кения) характеризуются большой пространственной и временной изменчивостью, что вызвано сложным рельефом, наличием больших внутренних озер (Виктория, Ньяса, Танганьика), влиянием Индийского океана, а также особенностями циркуляции синоптического (внутритропическая зона конвергенции, муссоны) и мезомасштаба [1]. Все это обусловливает погодные

и климатические различия в количестве осадков, режим которых создает влажные и засушливые районы, где серьезные засухи и малое количество осадков являются постоянной угрозой жизни [2].

Прогноз осадков невозможен без корректного описания основных метеорологических величин, основными из которых являются температура, влажность и скорость ветра. Только после того, как получен точный прогноз полей основных метеорологических величин, можно разработать хороший детерминированный и ансамблевый прогноз осадков [3, 4].

Для описания эволюции атмосферных процессов на территории Танзании применялась модель WRF — мезомасштабная гидродинамическая модель прогноза состояния атмосферы, созданная с целью обеспечить потребности как в оперативном прогнозе, так и в решении исследовательских задач [5].

Очевидно влияние разрешения модели на качество прогноза, что связано с детальностью описания эволюции и структуры атмосферных процессов. Но адекватность моделирования полей метеорологических величин также связана и с качеством описания подсеточных процессов, то есть с правильным выбором набора параметризаций.

Гидродинамическая мезомасштабная модель должна быть адаптирована к исследуемой территории, чтобы используемые параметризационные схемы лучшим образом описывали процессы в данном регионе.

Область моделирования в исследовании охватывает всю территорию Танзании и расположена в пределах от 28 до 42° в.д. и от 1 до 12° ю.ш. В численных экспериментах использовались две вложенные сетки с горизонтальным разрешением 15 и 5 км. Для корректного описания процессов в экваториальной зоне используется цилиндрическая проекция в декартовой системе координат. Начальные и граничные данные получены из результатов реанализа Национального Центра атмосферных исследований (NCAR) [6].

В исследовании изучалось влияние на образование осадков и качество прогноза следующих физических процессов и схем их параметризации.

1. *Микрофизика облаков*. Использовались следующие параметризации:
   а) схема Kessler — описывает осадки в жидком состоянии [7];
   б) схема Purdue Lin — учитывает пять видов гидрометеоров [8];
   в) схема WRF Single-Moment 6-Class (WSM6) — включает в себя описание процессов формирования льда, снега и крупы [9];
   г) схема Thompson — учитывает наличие в облаке льда, снега и крупы, концентрацию капель дождя и рассматривает эволюцию всех этих гидрометеоров во времени [10].
2. *Конвективные процессы*. Использовались следующие параметризации:
   а) схема Каина – Фритша (KF) — учитывает эффекты от мелкой и средней конвекции [11];
   б) схема Беттса – Миллера – Янича (BMJ) — рассматривает глубокую и мелкую конвекцию и их воздействие на профили температуры и влажности [12];
   в) ансамблевая схема Грелла – Дэвени (GD) — ансамблевый метод потоков масс, который учитывает восходящие и нисходящие потоки [13];
   г) трехмерная ансамблевая схема Грелла (G3d) — основана на гипотезе о квазиравновесном состоянии между членами ансамбля конвективных облаков,

учитывает эффект компенсационного опускания воздуха в окрестностях кучевых облаков [14].

3. *Процессы в пограничном слое атмосферы* описывались с использованием следующих схем параметризаций:
   а) схема Yonsei University (YSU) — нелокальная схема, учитывающая вовлечение и параболический профиль метеорологических величин в неустойчивом пограничном слое атмосферы [15];
   б) схема Mellor–Yamanda–Janjic (MYJ) — одномерная прогностическая схема, основанная на решении уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций, учитывающая перемешивание по вертикали [16];
   в) схема Asymmetric Convective Model (ACM2) — учитывает локальное и нелокальное перемешивание по вертикали [17].

Процессы в почве в экспериментах всегда описаны с использованием схемы Noah Land Surface Model, которая учитывает распространение влаги и тепла в почве в четырех подслоях, а также описывает эффекты от растительности, снежного покрова и физику мерзлого слоя почвы [18]. Для учета коротковолнового излучения использовались схема Dudhia [19], а длинноволнового — схема RTMM [20].

Рассматривалась только часть доступных схем параметризации, которые могут генерировать сотни комбинаций. Выбранные схемы, согласно проведенному обзору научной литературы, часто встречаются в исследованиях и оперативных прогнозах мировых центров погоды, а также, согласно проведенному анализу результатов предварительных численных экспериментов, лучше всего подходят для параметризации физических процессов в экваториальном регионе.

Были проведены численные эксперименты с различной комбинацией перечисленных схем параметризации физических процессов. Состав комбинаций схем параметризаций, используемый в численных экспериментах, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Конфигурация схем параметризаций в численных экспериментах

Схемы параметризации		
Микрофизики облаков	Конвективных процессов	Пограничного слоя атмосферы
Kessler (KS)	Kain Fritsch (KF)	Yonsei State University (YSU)
Purdue Lin (PL)	Betts-Miller-Janjic BMJ)	Miller-Yamanda-Janjic (MYJ)
Purdue Lin (PL)	Grell-Devenyi (GD)	Asymmetric Convective Model (ACM2)
WRF Single Moment (WSM6)	Betts-Miller-Janjic (BMJ)	Yonsei State University (YSU)
Thompson (TH)	Grell-Devenyi (GD)	Miller-Yamanda-Janjic (MYJ)
Thompson (TH)	Ensemble Grell 3d (G3)	Asymmetric Convective Model (ACM2)

В связи с тем, что целью данной работы было получение прогноза температуры (максимальной и минимальной) и осадков, то и верификация модели проводилась по этим величинам. Прогнозы рассчитывались с заблаговременностью 72 ч ежедневно от 00 ч в период с 18 по 24 декабря 2011 г. Особое внимание уделено прогнозам

на 19 и 20 декабря, так как в этот период наблюдались осадки очень большой интенсивности, например, на станции Дар Эс Салаам 19.12.2011 интенсивность осадков составила 156 мм/сутки.

Анализируя процессы в экваториальном регионе в рассматриваемый период, было установлено, что увеличение интенсивности осадков связано с усилением центов действия атмосферы северного полушария (Азорский и Сибирский антициклоны, Аравийское гребень), которое вызвано смешением ВЗК на юг. В южном полушарии южно-атлантический антициклон (антициклон острова Святой Елены) был относительно сильным, а южноиндийский антициклон относительно слабым. В результате этих процессов уменьшилась температура поверхности воды над экваториальной центрально-восточной частью Тихого океана, в то время как температура поверхности воды восточной и центральной экваториальной части Индийского океана увеличивалась. Доминировали северо-восточные, северо-западные и западные ветры в прибрежных регионах, что привело к усилению конвергенции в приземном слое атмосферы, развитию конвекции и повсеместным очень сильным дождям.

Для оценки качества результаты модельного прогноза интерполировались в точки расположения метеорологических станций, координаты которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Метеорологические станции, данные на которых используются для верификации результатов моделирования

Название метеорологической станции	Координаты метеорологической станции	
	Широта	Долгота
Дар Эс Салаам	−6,87	39,20
Сонгеа	−10,68	35,58
Букоба	−2,5	32,9
Мбея	−8,9	33,4

По интерполированным прогностическим значениям и данным наблюдений, полученным из Танзанийского метеорологического агентства (TMA), рассчитаны следующие ошибки: средняя ошибка прогноза (ME), среднеквадратическая ошибка (RMSE), средние систематические ошибки (MB). Перечисленные ошибки служили критерием для определения лучшей конфигурации модели. В данной статье представлены результаты оценки качества моделирования на внутренней мелкой (шаг 5 км) сетке.

Из-за сильной пространственно-временной изменчивости осадков на территории Танзании в численных экспериментах отдельно рассматривались 4 региона: северо-запад (станция Букоба), восточный (станция Дар Эс Салаам), южный (станция Сонгеа) и южное высокогорье (станция Мбея).

Анализ средней систематической ошибки прогнозов (табл. 3) позволяет говорить о том, что применение всех комбинаций параметризации на побережье Индийского океана (станция Дар Эс Салаам) в период с 18 по 24 декабря 2011 г. позволяет хорошо прогнозировать температуру, при этом не наблюдается ее систематического занижения

или завышения. Лучше всего прогнозируется средняя температура (относительная ошибка около 1 %), хуже всего — минимальная (около 14 %). Ошибки в прогнозе осадков небольшие: на станции Дар Эс Салаам варьируются от 1,3 до 3,6 мм/сутки.

Таблица 3

Систематические ошибки прогноза при разных комбинациях схем параметризаций

Эксперт. идентификации	111	222	237	621	832	857
Максимальная температура, K						
Дар Эс Салаам	−0,46	–0,27	–0,27	–0,29	–0,89	–0,26
Сонгеа	–0,78	–0,52	–0,45	–0,39	–0,33	–0,24
Букоба	–0,3	–0,2	–0,01	0,1	0,3	0,4
Мбея	–0,6	–0,48	–0,36	–0,23	–0,11	0,01
Минимальная температура, K						
Дар Эс Салаам	0,12	0,04	0,11	0,12	0,14	0,2
Сонгеа	–0,18	–0,16	–0,06	0,01	0,11	0,2
Букоба	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7
Мбея	–0,19	–0,07	0,06	0,18	0,3	0,42
Средняя температура, K						
Дар Эс Салаам	–0,08	0,02	0,04	0,07	0,01	0,09
Сонгеа	–0,49	–0,41	–0,41	–0,35	–0,42	–0,42
Букоба	–0,12	–0,05	–0,06	–0,01	–0,02	–0,05
Мбея	–0,4	–0,3	–0,34	–0,28	–0,27	–0,29
Осадки, мм/сутки						
Дар Эс Салаам	1,3	2,1	2,7	3,6	2	1,8
Сонгеа	0,99	0,11	1,0	0,09	1,1	0,7
Букоба	0,6	0,3	0,4	0,6	0,5	0,4
Мбея	0,4	0,2	1,1	1	0,9	0,5

На территории Танзании экстремальными считаются осадки интенсивностью больше 50 мм/сутки. При оценке качества прогноза осадков самым важным является ответ на вопрос, правильно ли прогнозируется факт наличия или отсутствия осадков. На станции Дар Эс Салаам, где наблюдались осадки интенсивностью 156 мм/сутки, во всех численных экспериментах прогностическое количество осадков меньше 50 мм/сутки, при этом наибольшее значение получено при использовании комбинации PL-GD-ACM2 (35,8 мм/сутки). А когда на станции наблюдалось 58 мм/сутки, все комбинации прогнозировали больше 20 мм/сутки, при этом комбинация KS-KF-YSU (66,3 мм/сутки) завышала интенсивность осадков.

Комбинация параметризаций KS-KF-YSU позволяет дать самый лучший прогноз количества осадков с ошибкой 1,3 мм/сутки, а самая низкая точность — при использовании комбинации WSM6-KF-YSU (ошибка 3,6 мм/сутки). Экстремальное количество осадков спрогнозировать не удалось.

Из анализа экспериментов можно сделать вывод об основной роли схемы параметризации конвекции и о несущественном влиянии на качество прогноза осадков в этом регионе Танзании схемы параметризации пограничного слоя атмосферы и микрофизики облаков. Из анализа результатов прогнозов следует, что лучшей для прогноза осадков на побережье Индийского океана является комбинация KS-KF-YSU.

Аналогичным образом были проанализированы результаты численных экспериментов (табл. 3) для южного региона страны (станция Сонгеа). Во всех численных экспериментах занижается максимальная, а также минимальная (кроме комбинации WSM6-KF-YSU, TH-GD-MYJ и TH-G3-ACM2) и средняя температура. Ошибки в прогнозе осадков на станции Сонгеа небольшие и варьируются от 0,1 до 1,1 мм/сутки.

На этой станции в данном цикле исследований были случаи, когда осадков не было, но модель (комбинация KS-KF-YSU) спрогнозировала осадки интенсивностью до 20,8 мм/сутки, а при использовании комбинация PL-BMJ-MYJ прогнозировалось минимальная интенсивность осадков 0,1 мм/сутки.

Статистические оценки показывают нам, что комбинация параметризаций WSM6-KF-YSU позволяет дать самый лучший прогноз количества осадков с ошибкой 0,1 мм/сутки, а самая низкая точность наблюдается при использовании комбинации TH-BMJ-ACM2 с ошибкой 1,1 мм/сутки. В этом регионе, как и в первом, качество прогноза осадков в основном зависит от схемы параметризации конвекции.

Из анализа результатов прогнозов получено, что лучшей для прогноза осадков в южном регионе страны является комбинация WSM6-KF-YSU.

Анализ средней систематической ошибки (см. табл. 3) результатов прогнозов позволяет говорить о том, что при использовании всех комбинации параметризаций на северо-западе Танзании (станция Букоба) в период с 18 по 24 декабря 2011 г. температура воздуха прогнозируется хорошо, так как самая большая ошибка меньше 1K. Ошибки в прогнозе осадков на этой станции не велики и варьируются от 0,3 до 0,6 мм/сутки. На этой станции во всех численных экспериментах прогнозируемое и наблюдаемое количество осадков было меньше 50 мм/сутки.

Комбинация параметризаций PL-BMJ-MYJ позволяет дать самый лучший прогноз количества осадков с ошибкой 0,2 мм/сутки, а самая низкая точность при использовании комбинации PL-GD-ACM2 (ошибка 1,1 мм/сутки).

Из анализа результатов, приведенных в табл. 3, следует, что все комбинации параметризаций при моделировании на юге высокогорья региона (станция Мбея) в период с 18 по 24 декабря 2011 г. позволяют хорошо прогнозировать минимальную температуру воздуха (относительная ошибка около 6 %), хуже всего прогнозируется максимальная (относительная ошибка 60 %) температура. Но все поля температуры прогнозируются хорошо, так как самая большая ошибка меньше 1K. Ошибки в прогнозе осадков на станции Мбея небольшие и изменяются от 0,2 до 1,1 мм/сутки. Комбинация параметризаций PL-BMJ-MYJ позволяет дать самый лучший прогноз количества осадков с ошибкой 0,2 мм/сутки, а самая низкая точность — при использовании комбинации WSM6-BMJ-YSU (ошибка 1,0 мм/сутки).

Результаты проведенных экспериментов показывают, что осадки на территории республики Танзания распределяются неравномерно и возникают за счет разных физических механизмов. Локальные причины, такие как горы и озера, бассейн реки

Конго, а также крупномасштабные синоптические процессы (Южный Индийский антициклон и антициклон острова Святой Елены) являются причинами возникновения осадков на территории Танзании. Влияние этих процессов по-разному проявляется в различные сезоны года и в разных регионах. В данном цикле исследований на юге, южном высокогорье и северо-западе страны осадки были связаны с ВЗК. Этим объясняется тот факт, что для хорошего гидродинамического прогноза осадков на территории Танзании лучше использовать вложенные сетки и разные наборы параметризаций в разных регионах. В целом, по результатам экспериментов сделан вывод о том, что лучшей для прогноза осадков в первом регионе побережье Индийского океана является комбинация схемы физики — Kessler-Kain Fritsch-Yonsei State University, в втором регионе (Сонгеа) — WRF Single Moment-Betts-Miller-Janjic-Yonsei State University, в третьем (Букоба) и в четвертом (Мбея) — Purdue Lin-Betts-Miller-Janjic-Miller-Yamanda-Janjic. Преимущество схемы параметризации Kain Fritsch (KF) на побережье Индийского океана (станции Дар Эс Салаам) может быть связано с тем, что, как правило, она учитывает комплексы микрофизических параметров, благодаря чему возможно описание мезомасштабных процессов, восходящих потоков и осадкообразования лучше, чем в других схемах. Схема Betts-Miller-Janjic (BMJ) требует достаточного количество влаги и отсутствия выделения скрытого тепла на ранней стадии восходящих конвективных движений.

Литература

1. *Ogallo L.J.* The Statistical Prediction of East African Rainfalls Using Quasi-Biennial Oscillation Phases Information // Kenya Journal of Science and Technology, 1982, A3, p. 43–54.
2. *Ntale H.E.* Prediction of East Africa Seasonal Rainfall Using Simplex Canonical Correlation Analysis // Journal of Climate, 2003, vol. 16, iss. 12, p. 2105–2112. — DOI:10.1175/1520-0442(2003)016<2105:POEASR>2.0.CO;2.
3. *WRF* Source Codes // WRF user [Electronic resource]: Boulder. Colorado. 2014. — URL: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html
4. *Kondowe A.L.* Impact of Convective Parameterization Schemes on the Quality of Rainfall Forecast over Tanzania Using WRF-Model // Natural Science, 2014, vol. 6, iss. 10, p. 691–699. — DOI:10.4236/ns.2014.610069.
5. *Kondowe A.L., Aniskina O.G.* Impacts of Grid Spacing and Cumulus Schemes on the Quality of Rainfall Forecasts over Tanzania // The Way of Science, 2014, vol. 1, iss. 8, p. 222–229.
6. *National* Centers for Atmospheric Research's (NCAR) [Electronic resource] // CSIL Research Data Archive. 2014. — URL: http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/?hash=access/
7. *Kessler E.* On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation. Series: Meteorological monographs. — American Meteorological Society, Boston, Massachussetts, 1969. — 84 pp.
8. *Lin Y.-L., Farley R.D., Orville H.D.* Bulk parameterization of the snow field in a cloud model // Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, vol. 22, iss. 6, p. 1065–1092. — DOI:10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2.
9. *Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K.* Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis // Monthly Weather Review, 2004, vol. 132, iss. 2, p. 519–542. — DOI:10.1175/1520-0493(2004)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2.
10. *Hong S.Y., Lim J.O.J.* The WRF Single-Moment Microphysics Scheme (WSM6) // Journal of the Korean Meteorological Society, 2006, vol. 42, p. 129–151.
11. *Kain J.S.* The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update // Journal of Applied Meteorology, 2004, vol. 43, iss. 1, p. 170–181. — DOI:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2.
12. *Betts A.K., Miller M.J.* The Betts-Miller Scheme. In: Emmanuel K.A. and Raymonds D.J. Eds. Representation of Cumulus Convection in Numerical. — American Meteorological Society, Boston, 1993. 246.

13. *Grell G.A., Devenyi D.* A Generalized Approach to Parameterizing Convection Combining Ensemble and Data Assimilation Techniques // Geophysical Research Letters, 2002, vol. 29, iss. 14, p. 38-1–38-4. — DOI:10.1029/2002GL015311.
14. *Grell G.A.* Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations // Monthly Weather Review, 1993, vol. 121, iss. 3, p. 764–787. — DOI:10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2.
15. *Hong S.-Y., Noh Y., Dudhia J.* A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes // Monthly Weather Review, 2006, vol. 134, iss. 8, p. 2318–2341. — DOI:10.1175/MWR3199.1.
16. *Janjić Z.I.* The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer and Turbulence Closure Schemes // Monthly Weather Review, 1994, vol. 122, iss. 5, p. 927–945. — DOI:10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2.
17. *Pleim J.E.* A Combined Local and Non-Local Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing // Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, vol. 46, iss. 9, p. 1383–1395. — DOI:10.1175/JAM2539.1.
18. *Tewari M.F., Chen W., Wang J., Dudhia M.A., LeMone K., Mitchell M.E., Gayno G., Wegiel J., Cuenca R.H.* Implementation and Verification of the Unified NOAH Land Surface Model in the WRF Model. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting. 16th Conference on Numerical Weather Prediction, Seattle, 11–15. 2004.
19. *Dudhia J.* Study of Convection Observed during the Winter Monsson Experiment Using a Meso-scale Two-Dimensional Model // Journal of the Atmospheric Sciences, 1989, vol. 46, iss. 20, p. 3077–3104. — DOI:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2.
20. *Mlawer E., Taubman S., Brown P., Iacono M., Clough S.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, vol. 102, iss. D14, p. 16663–16682. — DOI:10.1029/97JD00237.

Н.О. Моисеева, В.А. Ременсон, Е.А. Румянцева

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИНОПТИЧЕСКОЙ КЛИМАТОЛОГИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЫХОДНОЙ ПРОДУКЦИИ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ

N.O. Moiseeva, V.A. Remenson, E.A. Rumiantceva

APPLICATION OF THE SYNOPTIC CLIMATOLOGY METHOD IN AUTOMATED SYSTEMS OF THE STATISTIC INTERPRETATION OF THE OUTPUT PRODUCTION OF THE PREDICTIVE HYDRODYNAMIC MODELS OF THE ATMOSPHERE

Рассмотрены возможности применения современных оперативных численных глобальных, региональных и мезомасштабных моделей атмосферы для прогнозов элементов погоды, в том числе опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений.

Ключевые слова: гидродинамические модели атмосферы, статистическая интерпретация, синоптическая климатология, синоптические объекты, элементы погоды, опасные гидрометеорологические явления.

In this paper opportunities of the modern operational numerical global, regional and mesoscale models of the atmosphere to forecast weather elements, including forecast of dangerous and unfavourable phenomena, are considered.

Keywords: hydrodynamic atmospheric models, statistical interpretation, synoptic climatology, synoptic objects, weather elements, dangerous hydrometeorological phenomenas.

В настоящее время в области краткосрочного и среднесрочного прогнозирования элементов погоды и опасных гидрометеорологических явлений достигнуты значительные успехи, которые связаны с успешным решением следующих задач:

- разработки в ведущих метеорологических центрах Всемирной метеорологической организации (ВМО) современных глобальных, региональных и мезомасштабных гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы;
- создания в крупных метеорологических центрах уникальных прогностических технологий, позволяющих внедрить эти модели в практику статистической, физико-статистической и синоптической интерпретации выходной продукции ГДМА;
- организации непрерывного функционирования глобальных международных систем наблюдений, телесвязи и обработки данных [4].

Применяемые методы интерпретации гидродинамических прогнозов делят на две группы. К первой группе относят способы синоптической интерпретации [4]. В них входит анализ результатов гидродинамической модели и подготовка на их основе

прогностических карт с положением атмосферных фронтов, облаков, зон осадков, полей приземной температуры воздуха, ветра и других элементов погоды. Вторая группа включает в свой состав методы статистической и физико-статистической (объективной) интерпретации продукции ГДМА. В данных методах интерпретации используют регрессионный, дискриминантный и кластерный анализы. При этом подходе проводится расчет синхронных (статистических) связей между прогностическими полями, получаемыми по ГДМА (предикторами) и элементами погоды (предиктантами). Для использования системы статистической интерпретации необходимо создание соответствующей базы данных, включающей архивы: фактических значений прогнозируемых метеорологических величин в пунктах прогноза, а также полей циркуляции атмосферы по данным объективного анализа и численного прогноза за длительный период времени. В нашей стране наиболее успешно задача применения методов объективной интерпретации продукции ГДМА для среднесрочных прогнозов погоды в технологии расчета элементов погоды (РЭП) используется в Гидрометцентре России.

Прогностическая технология РЭП программно реализует адаптивный алгоритм самообучающейся по исходной дате и координатам пункта на дату прогноза по заданной заблаговременности с учетом процессов макромасштаба, спрогнозированных ГДМА.

Прогностическая технология РЭП реализована более чем для 5000 городов мира и детализирована для территории России (1300 городов). Расчеты проводятся в оперативные сроки с использованием архивно-информационной базы данных, включающих метеорологические наблюдения и результаты численных анализов и прогнозов метеорологических полей.

Математическое и программное обеспечения прогностического алгоритма расчета элементов погоды включают блоки центрального типирования атмосферных макропроцессов; формирования обучающих выборок; численных статистических моделей прогнозов метеорологических величин и явлений погоды.

Статистическая модель центрального типирования атмосферных процессов строится для каждой даты и пункта прогноза по ограниченному географическому району с расположением пункта прогноза в центре сеточной области. Статистические выборки ранжируются по показателю схожести (аналогичности) к текущему макропроцессу, предсказанному ГДМА. Для формирования статистических обучающих выборок привлекаются даты, принадлежащие одному и тому же скользящему периоду, к которому принадлежит день прогноза. Продолжительность периода принимается равной трем неделям.

В алгоритме реализуются статистические модели регрессионного анализа, дискриминантного анализа, кластерного анализа и другие статистические методы. Адаптивные численные статистические модели строятся с использованием синхронных статистических связей между характеристиками прогностических метеорологических полей и каждым из элементов погоды в отдельности или комплексом элементов. В число виртуальных предикторов включают метеорологические величины, дифференциальные и интегральные характеристики метеорологических полей и другие показатели, которые могут быть получены на основе выходной продукции глобальных и региональных ГДМА.

В настоящее время по технологии РЭП рассчитывают:

- среднесрочные прогнозы минимальной и максимальной температуры воздуха и ее аномалий с заблаговременностью до 7 суток;
- декадные прогнозы средней температуры воздуха и ее аномалий;
- прогнозы вероятности и количества осадков по дням для территории России;
- прогнозы аномально холодной и аномально жаркой погоды с заблаговременностью 48–144 ч в критериях опасных явлений погоды.

На основе выходной продукции этого технологического комплекса могут быть разработаны специальные прогнозы для ограниченного числа опасных явлений погоды (ОЯ) и неблагоприятных гидрометеорологических явлений (НГЯ). Непосредственно для прогноза ОЯ и НГЯ в Гидрометцентре России разработан программный комплекс прогноза конвективных ОЯ (ливней, шквалов, града, совокупности ОЯ с детализацией типа и интенсивности) с заблаговременностью не менее 24 часов на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра. Особенностью комплекса является единая реализация технологий регионального прогнозирования погоды, в том числе прогноза ОЯ и НГЯ конвективного характера с ежечасной дискретностью и расчетом прогностических карт за период в 12 часов. Этот программный комплекс включает прогнозы:

- ливней в трех градациях;
- шквалов в трех градациях;
- града в градациях НГЯ и ОЯ;
- конвективных комплексов НГЯ и ОЯ с детализацией типа явления;
- максимального количества осадков;
- шквалов любой интенсивности;
- максимальной скорости ветра при шквале.

В дополнение к технологическим комплексам численного прогнозирования элементов погоды используются методы синоптической инетерпретации выходной продукции ГДМА [4]. Этот метод остается особенно актуальным при разработке среднесрочных прогнозов элементов погоды, НГЯ и ОЯ с заблаговременностью от 3 до 7–10 суток, т.к. подавляющее большинство физико-статистических моделей прогнозов дают удовлетворительные результаты только на 1–2 суток. В то же время поля приземного атмосферного давления и геопотенциальных высот уже в настоящее время удовлетворительно прогнозируются численными моделями на 5–6 суток, а при использовании многомодельного метода [2] срок прогнозирования может быть увеличен до 7–8 суток. Представляется целесообразным объединить модели физико-статистического прогнозирования элементов погоды с методом синоптической интерпретации ГДМА на средние сроки. При использовании метода синоптической интерпретации ГДМА примем во внимание, что в настоящее время на сроки более 3 суток удовлетворительно прогнозируется не столько состояние атмосферы, сколько процесс конкретного масштаба, а именно: на 3–5 суток — положение синоптических образований у поверхности земли, на 7–10 суток — положение крупномасштабных барических образований в средней тропосфере.

По существу, в технологии РЭП уже успешно решена задача объединения обоих методов интерпретации выходной продукции ГДМА в процедуре формирования прогностических выборок по принципу аналогичности к текущему макропроцессу,

предсказанному гидродинамической схемой для регионов с пространственными масштабами более 2000 км. По определению, данному в работе [1], основной целью синоптической климатологии является нахождение связей между локальными и региональными климатами и атмосферной циркуляцией, синоптический климатологический анализ должен включать два этапа: определение типов атмосферной циркуляции и оценки элементов погоды для выделенных типов.

В связи с тем, что в основу синоптического метода прогнозирования погоды положены статистические связи между основными синоптическими объектами и связанными с ними синоптическими процессами и элементами погоды, представляется целесообразным выявить связи между ними. В данной статье в число основных синоптических объектов включены циклоны, антициклоны, ложбины, гребни, седловины, малоискривленные барические поля.

При применении численных методов типизации синоптических ситуаций у поверхности Земли для определения областей повышенного и пониженного атмосферного давления и направления переноса воздушных масс в работе [3] показано, что можно ограничиться двумя характеристиками барического поля: лапласианом атмосферного давления $\nabla^2 p$ и градиентом давления воздуха $\dfrac{\overrightarrow{\partial p}}{\partial n}$.

Лапласиан приземного давления характеризует циклоничность (антициклоничность) поля давления, а следовательно, конвергенцию (дивергенцию) воздушных потоков и вертикальные движения на верхней границе пограничного слоя и в значительной части тропосферы, а градиент давления — горизонтальную адвекцию температуры и влажности воздуха. Лапласиан давления присутствует практически во всех регрессионных и дискриминантных моделях прогнозирования конвективных ОЯ, а градиент давления используется в моделях прогнозирования траекторий воздушных частиц, упорядоченных вертикальных движений воздуха, внутримассовой облачности, конвективных ОЯ.

Лапласиан приземного давления рассчитывается по формуле

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}, \tag{1}$$

где x и y — оси системы координат, ось x направлена на восток, ось y — на север; p — атмосферное давление, приведенное к уровню моря.

Величина модуля горизонтальной составляющей градиента давления $|grad\, p|$ и его направление α_x определяются по соотношениям:

$$\left| grad\ p \right| = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, \tag{2}$$

$$\alpha_x = \arcsin\left(\frac{|p_y|}{\left| grad\ p \right|} \right) + k\left(90^\circ\right), \quad k = 0(1)3, \tag{3}$$

где $p_x = \partial p/\partial x$, $p_y = \partial p/\partial y$ — составляющие градиента приземного давления по осям x и y выбранной системы координат; α_x — угол между осью x и изобарой.

На рис. 1 приведена географическая сетка точек для вычисления производных и лапласианов поля приземного давления.

Составляющие градиента приземного давления (p_x, p_y) и слагаемые лапласиана (p_{xx}, p_{yy}) будем вычислять с использованием следующих конечно-разностных аналогов соотношений (1) и (2):

$$p_x = \frac{1}{8h}\Big[\big(p_{i-1,\,j+1} - p_{i-1,\,j-1}\big) + 2\big(p_{i,\,j+1} - p_{i,\,j-1}\big) + \big(p_{i+1,\,j+1} - p_{i+1,\,j-1}\big)\Big], \tag{4}$$

$$p_y = \frac{1}{8h}\Big[\big(p_{i-1,\,j+1} - p_{i+1,\,j+1}\big) + 2\big(p_{i-1,\,j} - p_{i+1,\,j}\big) + \big(p_{i-1,\,j-1} - p_{i+1,\,j-1}\big)\Big], \tag{5}$$

$$p_{xx} = \frac{1}{4h^2}\Big[\big(p_{i-1,\,j+1} + p_{i-1,\,j-1} - 2p_{i-1,\,j}\big) + 2\big(p_{i,\,j+1} + p_{i,\,j-1} - 2p_{i,\,j}\big) + \\ + \big(p_{i+1,\,j+1} + p_{i+1,\,j-1} - 2p_{i+1,\,j}\big), \tag{6}$$

$$p_{yy} = \frac{1}{4h^2}\Big[\big(p_{i-1,\,j+1} + p_{i+1,\,j+1} - 2p_{i,\,j+1}\big) + 2\big(p_{i-1,\,j} + p_{i+1,\,j} - 2p_{i,\,j}\big) + \\ + \big(p_{i-1,\,j-1} + p_{i+1,\,j-1} - 2p_{i,\,j-1}\big), \tag{7}$$

где h — шаг сетки.

На рис. 2 представлены графические модели типовых синоптических объектов, которые могут быть получены с использованием соотношений (4)–(7).

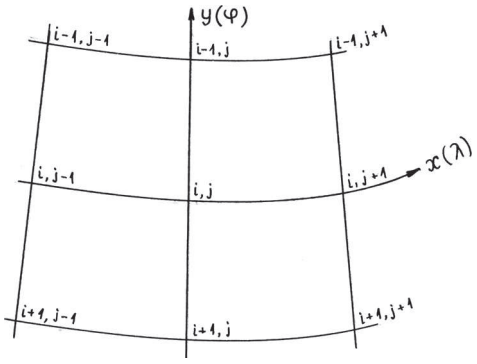


Рис. 1. Географическая сетка точек для вычисления производных и лапласианов поля атмосферного давления

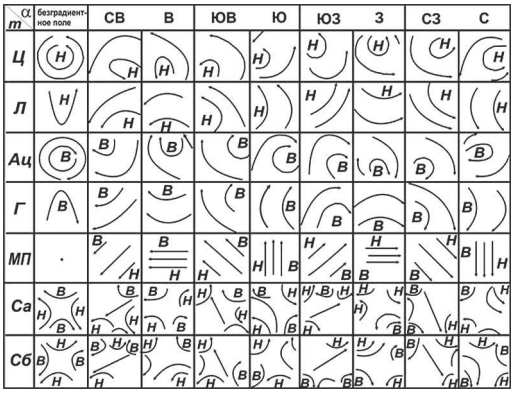


Рис. 2. Графические модели синоптических объектов [3]

В табл. 1 и 2 приведены критерии для определения основных типов синоптических объектов (образований).

Таблица 1

Критерии для численного определения основных типов синоптических объектов (барических образований)

№ п/п	Барические образования	$p_{xx}(\lambda\lambda)$	$p_{yy}(\varphi\varphi)$
1	Циклон	$p_{xx} > \delta p_1$	$p_{yy} > \delta p_1$
2	Ложбина	$\lvert p_{xx}\rvert \leqslant \lvert\delta p_1\rvert$ $p_{yy} > \delta p_1$	$p_{xx} > \delta p_1$ $\lvert p_{yy}\rvert \leqslant \lvert\delta p_1\rvert$
3	Гребень	$p_{yy} < -\delta p_1$ $\lvert p_{xx}\rvert \leqslant \lvert\delta p_1\rvert$	$\lvert p_{yy}\rvert \leqslant \lvert\delta p_1\rvert$ $p_{xx} < -\delta p_1$
4	Антициклон	$p_{xx} < -\delta p_1$	$p_{yy} < -\delta p_1$
5	Малоискривленные поля давления	$\lvert p_{xx}\rvert \leqslant \lvert\delta p_1\rvert$	$\lvert p_{yy}\rvert \leqslant \lvert\delta p_1\rvert$
6	Седловина	$p_{xx} > \delta p_1$ $p_{yy} < -\delta p_1$	$p_{yy} < -\delta p_1$ $p_{xx} > \delta p_1$

Таблица 2

Критерии для численного определения основных направлений изобар

№ п/п	Основные направления	Критерии	
		p_x	p_y
1	СВ, В	$p_x > \delta p_2$	$p_y \geqslant \delta p_2$
2	ЮВ, Ю	$p_x \geqslant \delta p_2$	$p_y < \delta p_2$
3	ЮЗ, З	$p_x < \delta p_2$	$p_y\, \delta p_2$
4	СЗ, С	$p_x \leqslant \delta p_2$	$p_y > \delta p_2$
5	Штиль	$\lvert p_x\rvert \leqslant \delta p_2$	$\lvert p_y\rvert \leqslant \delta p_2$

При определении величин лапласиана и градиента давления по данным наблюдений в узлах сетки значительные ошибки могут возникать при наличии малоградиентных барических полей, поэтому необходимо заранее определить величину погрешностей, при которых поля считаются «плоскими», «малоискривленными» и «безградиентными». Эти ситуации будут соответствовать переходным состояниям между циклоническими и антициклоническими образованиями (малая искривленность).

Выбор критериев для численного определения дифференциальных характеристик полей атмосферного давления δp_1 и δp_2 осуществлялся путем проведения численных экспериментов. Для удобства использования критериальных значений умножим правые части соотношений (4) и (5) на $8h$, а соотношения (6) и (7) – на $4h^2$. С учетом этих упрощений было проведено несколько сотен численных экспериментов, которые позволили определить, что минимальная ошибка идентификации типов барических образований наблюдается при $\delta p_1 \approx 0{,}6$ гПа. Для направлений изобар $\delta p_2 \approx 0{,}9$ гПа.

При использовании широтно-долготной сетки координат приходится учитывать изменение шага сетки вдоль широтных кругов (вдоль оси x) от экватора к полюсу, а также то, что в используемых метеорологических архивах данные по широте представлены через 5°, а по долготе — через 10°. Для того чтобы получить данные по долготе через 5°, перед вычислением p_x, p_y, p_{xx}, p_{yy} необходимо провести линейную интерполяцию значений давления на промежуточные меридианы, кратные 5° со смежных

меридианов, кратных 10°, а для выравнивания шагов по меридианам и параллелям использовать переменный шаг по широтным кругам. Для широтных зон шаги по широте и долготе принимались равными следующим значениям: (0° – 45°) – 5°, (50° – 65°) – 10°, (70° – 75°) – 20°, (75° – 80°) – 30°, (80° – 85°) – 60°.

В ВКА им. А.Ф. Можайского было показано, что вместо 45 типовых моделей синоптических объектов, графическое изображение которых показано на рис. 2, достаточно ограничиться множеством из 16 типовых ситуаций , сформировав следующие классы: «циклоны – ложбины», «антициклоны – гребни», «малоискривленные поля» и «седловины». Кроме того, для первых трех классов можно объединить и направления изобар, а именно: «СВ-В», «ЮВ-Ю», «ЮЗ-З», «СЗ-З» и «безградиентные поля» (адвекция отсутствует). Для четвертого класса, включающего все типы седловин, направления изобар целесообразно вообще не учитывать в связи с малой повторяемостью объектов данного класса.

Выбранные 16 типов синоптических объектов дают вполне удовлетворительные результаты при нахождении статистических связей между характеристиками поля атмосферного давления и элементами погоды. В этом случае по двум характеристикам поля атмосферного давления (p_x, p_y, p_{xx}, p_{yy}) с учетом критериев, представленных в таблицах (1) и (2), можно однозначно определить тип барического образования (синоптического объекта) $s_l[l = 1(1)16]$ в любой точке сетки. Для увеличения объема статистических выборок, которые используются при разработке физико-статистических моделей прогнозирования метеорологических величин и элементов погоды, была проведена типизация синоптических объектов для 612 точек Северного полушария (шаг сетки 5×5 градусов) на основе архива ВНИИГМИ-МЦД (шифр «KTPHGDFL») за 1964–1988 гг. Объем исходной выборки составлял 9130 полей атмосферного давления по сеточной области, включающей 684 узла. Исходный файл, содержащий информационный массив, представлялся в следующем виде

$$\left\{\left(p_{0(684)}, \varphi, \lambda\right), \quad i = 1(1)9130\right\}, \tag{8}$$

где i — порядковый номер записи поля давления в 684 точках за один срок; φ, λ — географические координаты точки, отображенные в номера узлов (m = 1(1)19 — число широтных кругов, l =1(1) 36 — число меридианов).

В результате типизации, выполненной с использованием значений слагаемых лапласианов (p_{xx}, p_{yy}) и составляющих градиентов давления (p_x, p_y) с учетом критериев, представленных в табл. 1 и 2, для каждого из сезонов получен календарь типов синоптических объектов в виде информационного массива

$$\left\{\left(TIP_{(612)}, \varphi, \lambda\right), \quad i = 1(1)9130\right\}. \tag{9}$$

Размерность исходного информационного массива $p_{0(684)}$ уменьшилась при переходе к массиву $TIP_{(612)}$ вследствие использования дифференциальных характеристик при типизации синоптических объектов.

После процедуры типизации синоптических объектов, множество которых было разделено на 16 подмножеств, решалась задача прикладного синоптико-климатического

районирования территории Северного полушария с использованием алгоритма последовательной иерархической кластеризации Уорда – Уишарта. В результате кластеризации на территории Северного полушария в зависимости от сезона года было выделено от 47 до 94 однородных синоптико-климатических районов (ОСКР). Для каждого из ОСКР найдены координаты статистических центров и для этих центров составлен календарь типов синоптических объектов. В качестве примера на рис. 3 представлена карта ОСКР для зимнего сезона.

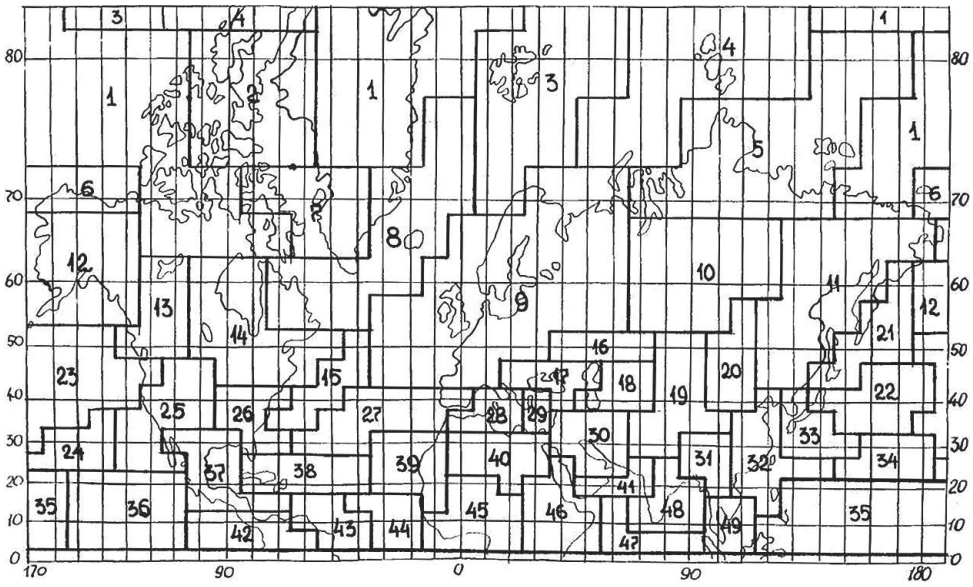


Рис. 3. Карта однородных синоптико-климатических районов. Зима. Северное полушарие

Литература

1. *Беркович Л.В., Ткачева Ю.В.* Гидродинамический краткосрочный прогноз погоды в пунктах // Сб. трудов «80 лет Гидрометцентру России». — М.: «Триада ЛТД», 2010. — С. 136–146.
2. *Девяткин А.М., Моисеева Н.О., Ременсон В.А., Удриш В.В.* Современные технологии численного прогнозирования барических полей в интересах метеорологического обеспечения планбирования действий войск (сил) // Тр. III Всерос. науч. конф. «Проблемы военно-прикл. геофизики и контроля состояния природ. среды». — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. Т. 1. — С. 102–113.
3. *Садовников А.В.* Характеристика синоптических процессов над территорией Советского Союза: учебное пособие. — Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1973. — 118 с.
4. *Сборник* трудов «80 лет Гидрометцентру России». — М.: «Триада ЛТД», 2010. — 401 с.

.

С.П. Смышляев, В.Я. Галин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА НА ХИМИЮ ТРОПОСФЕРЫ

S.P. Smyshlyaev, V.Ya. Galin

A STUDY OF STRATOSPHERIC OZONE IMPACT ON THE TROPOSPHERIC CHEMISTRY

Анализ спутниковых измерений содержания стратосферного и тропосферного озона и численные эксперименты с химико-климатической моделью нижней и средней атмосферы позволили получить оценки влияния изменения содержания стратосферного озона на концентрацию тропосферного озона. Основным выводом работы является заключение о том, что хотя продукция тропосферного озона при уменьшении его стратосферного содержания увеличивается преобладающей тенденцией отклика тропосферного озона в этих условиях является уменьшение потока озона из стратосферы, в результате чего содержание тропосферного озона в большинстве районов или мало меняется, или уменьшается.

Ключевые слова: химический состав атмосферы, фотодиссоциация, стратосфера, тропосфер, численное моделирование.

An analysis of stratospheric and tropospheric ozone satellite observations and numerical modeling has been performed to study stratospheric ozone impact on tropospheric ozone. The basic result of this work demonstrate the dominate role of ozone flux from the troposphere over its local production.

Keywords: atmospheric chemical composition, photodissociation, stratosphere, troposphere, numerical modeling.

В течение последних десятилетий результаты измерений регистрируют изменения газового состава и температуры как в тропосфере, так и в стратосфере [15, 26]. Наибольший общественный резонанс среди этих изменений получили тропосферное глобальное потепление и сокращение стратосферного озона. Обеспокоенность этими тенденциями привела к заключению Международных соглашений, направленных на ограничение антропогенных воздействий на повышение температуры тропосферы и утончение озонового слоя в стратосфере [17, 18, 25]. Однако кроме этих явлений наблюдения также показывают охлаждение стратосферы и изменение содержания тропосферного озона [21, 26]. Все эти явления, относящиеся к разным высотным слоям атмосферы — тропосфере и стратосфере, могут быть взаимосвязаны и влиять друг на друга.

Одним из важнейших аспектов стратосферно-тропосферного взаимодействия является взаимное влияние химических процессов. Большинство малых газов стратосферы имеют источники на поверхности Земли [5], поэтому, прежде чем достичь стратосферы, они проходят через тропосферу, где могут подвергаться химической трансформации, от интенсивности которой зависит их количество, поступающее

в стратосферу. С другой стороны, интенсивность химических реакций в тропосфере критическим образом зависит от обмена газами со стратосферой и от прохождения солнечной радиации через стратосферу.

Солнечная ультрафиолетовая радиация является ключевым фактором, определяющим интенсивность химических процессов в тропосфере [22]. Величина потока ультрафиолетовой радиации, достигающего тропосферы, в значительной степени определяется толщиной озонового слоя в стратосфере [17]. Соответственно, уменьшение содержания озона в стратосфере может привести к увеличению потоков УФ радиации, доходящих до тропосферы, и к интенсификации химических процессов в нижней атмосфере. В свою очередь возмущение химии тропосферы может изменить потоки газов с поверхностным источником в стратосферу. Это может повлиять теперь уже на химию стратосферы и изменить содержание стратосферного озона с последующим влиянием опять на потоки ультрафиолетовой радиации в тропосфере. Таким образом, могут возникнуть обратные связи между химией стратосферы и тропосферы.

Экспериментальные и теоретические исследования обнаружили, что в отличие от стратосферного озона, который в конце XX в. имел устойчивую длиннопериодную тенденцию к уменьшению [8, 21, 26], в изменчивости тропосферного озона трудно обнаружить значимый тренд [16, 24]. В зависимости от местных условий содержание озона в приземном слое и в целом в тропосфере может как увеличиваться, так и уменьшаться в ответ на сокращение стратосферного озона [16, 21, 24, 26].

С теоретической точки зрения изменение озона в тропосфере и в приземном слое определяется двумя основными факторами: динамическим, связанным с нисходящими потоками из стратосферы, содержащей значительно большее количество молекул озона по сравнению с тропосферой, и фотохимическим, определяемым локальной продукцией озона в тропосфере и приземном слое при окислении угарного газа и углеводородов в присутствии окислов азота [4, 8]. При этом, по разным оценкам, доминирующим источником тропосферного озона могут быть как фотохимический [8], так и динамический [4] факторы. При преобладании фотохимического фактора уменьшение стратосферного озона может привести к увеличению продукции тропосферного озона из-за увеличения скоростей окисления углеводородов в условиях повышенного ультрафиолетового облучения [8, 22]. Если доминирует динамический фактор, то при уменьшении содержания стратосферного озона ослабевают его потоки в тропосферу, и можно ожидать уменьшения содержания и тропосферного озона.

С другой стороны, в результате изменения потоков солнечной радиации, достигающих тропосферы, может увеличиться как продукция основных тропосферных газов, таких как озон, гидроксильные радикалы и окислы азота, так и их разрушение [4, 22]. Таким образом, знаки и количественные эффекты обратных связей между химическими процессами в стратосфере и тропосфере зависят от конкретных пространственно-временных условий, так как в результате возмущения химии тропосферы количество разрушителей озона в стратосфере может как увеличиться, так и уменьшится. Кроме того, изменение скоростей химических реакций может определяться и вариациями температуры, и динамики тропосферы и стратосферы, которые зависят от нагрева атмосферы, определяемого содержанием озона и других радиационно-активных газов [17, 22].

Для детального исследования качественных и количественных аспектов взаимодействия химических процессов в стратосфере и тропосфере целесообразно сочетать анализ одновременных измерений содержания стратосферных и тропосферных газов и теоретическое численное моделирование с использованием моделей, в которых детально описана как химия стратосферы, так и химия тропосферы, а также их связь с изменениями температуры и динамики атмосферы.

В связи с тем, что изменчивость содержания тропосферных газов при изменении содержания стратосферного озона может определяться как химическими, так и физическими процессами, важно понять относительную роль этих процессов по отдельности. Поэтому целью настоящей работы являлось исследование влияния изменчивости содержания стратосферного озона на химию тропосферы в результате изменения потоков солнечной радиации, достигающих высот тропосферы. Для достижения данной цели используется химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы, в которой изменения газового состава, радиационного режима и циркуляции атмосферы рассчитываются как в стратосфере, так и в тропосфере. Подобная модель позволяет учесть и взаимодействие между химическими и физическими процессами, что предполагается исследовать в дальнейших работах по развитию направления изучения различных аспектов стратосферно-тропосфер ного взаимодействия.

Методология исследования

На первом этапе настоящей работы анализировались результаты одновременных спутниковых измерений содержания как стратосферного, так и тропосферного озона. Сравнение фаз изменчивости количества озона в стратосфере и тропосфере позволяет оценить наличие и знак связей между их содержанием. Среди подобных одновременных измерений были выбраны спутниковые наблюдения прибором TOMS [20], которые предназначены, главным образом, для измерения общего содержания озона в атмосфере, но для которых существуют методики разделения стратосферного и тропосферного содержания на основе привлечения дополнительной информации [11, 12, 27].

На втором этапе для исследования чувствительности тропосферной химии к изменению содержания стратосферного озона в рамках настоящей работы были выполнены численные эксперименты с моделью газового состава атмосферы. В модели задавалась реальная изменчивость факторов, влияющих на содержание стратосферного озона, и исследовалось изменение скоростей фотодиссоциации и концентраций ключевых газов в тропосфере при изменении содержания стратосферного озона. Расчеты проводились для периода с 1979 по 2005 г. в соответствии со сценариями ВМО [26], определяющими изменчивость поверхностных потоков газов, влияющих на содержание стратосферного озона.

Для проведения настоящего исследования использовалась глобальная химико-климатическая модель (ХКМ) нижней и средней атмосферы [3], охватывающая высотный диапазон от земной поверхности до 90 км с переменным шагом по высоте. В горизонтальном направлении ХКМ охватывает весь земной шар с равномерными шагами по широте (4 градуса) и по долготе (5 градусов). В динамическом блоке модели уравнения гидротермодинамики атмосферы, записанные в адвективной форме,

решаются конечно-разност ным методом с применением полунеявной схемы расчета [1]. Прогностическими переменными в динамическом блоке модели являются скорости ветра, температура, удельная влажность и приземное давление.

В химическом блоке модели учитывается изменчивость 74 основных газовых составляющих, прямо или косвенно влияющих на химию как стратосферы, так и тропосферы [9, 23]. В модели учитываются реакции кислородного, водородного, азотного, хлорного, бромного и углеводородного циклов, что позволяет рассматривать влияние химических процессов на образование и эволюцию озона и влияющих на него газов в стратосфере и тропосфере. При расчете скоростей фотодиссоциации учитывается поглощение и рассеяние солнечной радиации атмосферными газами и аэрозолями [10]. Количество и тип учитываемых фотохимических реакций позволяет исследовать изменчивость основных химически активных газов как в стратосфере, так и в тропосфере и мезосфере.

Для учета обмена газами между тропосферой и стратосферой на каждом временном шаге модели рассчитанные в динамическом блоке скорости ветра и температура учитывались при моделировании переноса газовых примесей и скоростей химических реакций в химическом блоке, а, с другой стороны, рассчитанные в химическом блоке значений содержания радиационно-активных газов учитывались в динамическом блоке модели для оценки скоростей нагрева и выхолаживания атмосферы, влияющих на изменения температуры и ветра в атмосфере.

При проведении модельных экспериментов нижние граничные условия потоков химически активных газов задавались на основании сценариев Всемирной метеорологической организации (ВМО) [26], данные о температуре поверхности океана и площади покрытия льдом — по данным эксперимента АМИП [13], а значения площади поверхности атмосферного аэрозоля — по результатам спутникового эксперимента SAGE [19]. Переменные значения влияющих параметров позволили провести исследование взаимодействия стратосферной и тропосферной химии для различных уровней внешних характеристик.

Для исследования влияния уменьшения стратосферного озона на химию тропосферы модельные расчеты проводились по двум сценариям. В первом из них учитывалось влияние всех факторов изменчивости озона, а во втором сценарии не учитывалось влияние вулканических выбросов на содержание стратосферного озона. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что в результате гетерогенных химических реакций на поверхности достигающего стратосферы вулканического аэрозоля активируется разрушение стратосферного озона, в результате чего его содержание может существенно уменьшиться [8, 14, 21, 26]. Сравнение результатов модельного эксперимента с отсутствующим вулканическим аэрозолем с результатами базового модельного эксперимента, в котором учитывалось влияние вулканического аэрозоля, позволило получить оценки влияния изменчивости стратосферного озона на химию тропосферы, так как разница между содержанием аэрозоля касалась только стратосферы.

Результаты исследования

На рис. 1 приведены результаты анализа одновременных измерений содержания стратосферного и тропосферного озона, полученные на основе сравнения измерений

приборами TOMS и SBUV для 1979–2005 гг. [11, 12]. На рисунке приведены среднегодовые данные, осредненные для неполярных широт. Стратосферный озон (верхний рисунок) в течение всего периода показывает отрицательную тенденцию, которая является значимой с почти 100 % доверительной вероятностью. Для тропосферного озона, на первый взгляд, также очевидной является положительная тенденция с достаточно высокой доверительной вероятностью (нижний рисунок). Однако при внимательном рассмотрении видно, что в изменчивости тропосферного озона можно выделить два периода, связанных с использованием прибора TOMS на спутнике Nimbus-7 до 1993 г. и на спутнике Earth Probe с 1996 г. Если рассмотреть эти периоды по отдельности, то для первого из них отмечается отрицательная тенденция в изменчивости тропосферного озона с доверительной вероятностью 76 %, а для второго — положительная тенденция, тоже с относительно невысокой доверительной вероятностью 82 %.

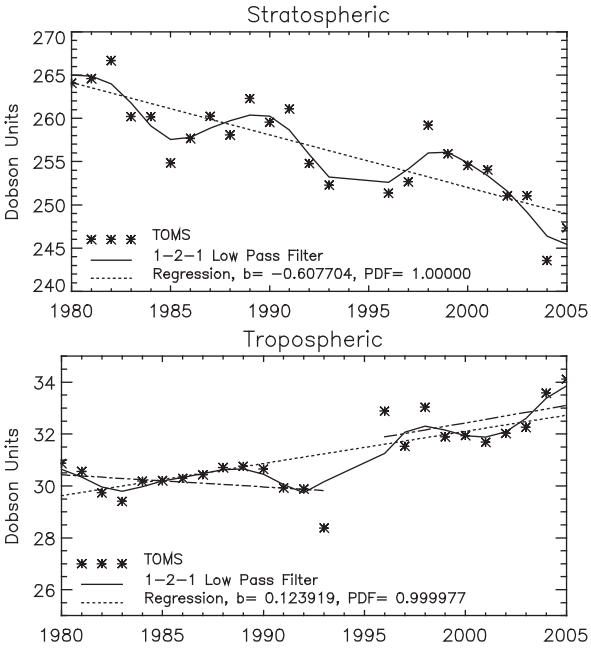


Рис. 1. Изменение стратосферного и тропосферного озона в неполярных широтах по результатам спутниковых измерений TOMS и SBUV

Если рассмотреть отдельные периоды увеличения и уменьшения тропосферного и стратосферного содержания озона (сплошные кривые с отфильтрованными высокочастотными колебаниями), то за исследуемый период для стратосферного озона можно отметить два периода с существенным уменьшением его содержания, связанные с извержениями вулканов Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991). В стратосферном озоне влияние этих вулканов привело к глобальному уменьшению содержания озона, регистрируемого в течение 4–5 лет после извержений. В тропосферном

озоне для этих периодов, оба которых попадают на период действия прибора TOMS на спутнике Nimbus-7, также можно отметить уменьшение содержания, что заставляет предположить более существенную роль динамического фактора по сравнению с фотохимическим. Следует, правда, отметить, что извержение вулкана Пинатубо пришлось на конец периода действия спутнике Nimbus-7, из-за чего измерения в последнем, 1993 г., когда отмечается максимальное уменьшение как стратосферного, так и тропосферного озона, охватывают только начало года и выводы по ним следует делать с осторожностью.

Если рассчитать коэффициент корреляции между изменениями стратосферного и тропосферного озона по данным для отдельных лет, то он получается для среднегодовых значений отрицательным –0,6, что говорит об антикорреляции между изменениями стратосферного и тропосферного содержания зона и о возможной важной роли фотохимического фактора влияния изменений стратосферного озона на химию тропосферы. Значимость этой корреляционной связи, в соответствии с критерием Фишера [6], получается высокой — превышает 99 %, однако коэффициент детерминации для данного рода зависимости будет 0,36, что говорит о том, что более 60 % дисперсии объясняется не линейной связью между изменчивостью стратосферного и тропосферного озона, а другими факторами. Кроме того, следует заметить, что основной вклад в отрицательную корреляцию дает период измерений со спутника Earth Probe (1996–2005), а для измерений со спутника Nimbus-7 (1979–1993) — коэффициент корреляции получается положительным, равным 0,44.

Анализ результатов спутниковых измерений приборами TOMS и SBUV показал, что и динамический, и фотохимический факторы влияния изменчивости стратосферного озона на тропосферную химию могут играть существенную роль. В связи с тем, что полученные результаты могли быть в какой-то степени связаны с особенностями использования приборов TOMS и SBUV и методики разделения стратосферной и тропосферной частей общего содержания озона, был проведен анализ результатов разделения озона в тропосфере и стратосфере по другой методике — с использованием данных спутниковых измерений TOMS и UARS [27]. Результаты были получены для тропической зоны Тихого океана и охватывали тот же временной период — 1979–2005 гг.

Результаты межгодовой изменчивости тропического стратосферного и тропосферного озона приведены на рис. 2. В тропической зоне содержание стратосферного озона в меньшей степени подвержено влиянию вулканических выбросов, а в большей степени — воздействию солнечной активности и квазидвухлетних колебаний циркуляционного режима [2, 7]. В долгопериодной изменчивости и для этой серии измерений уменьшение стратосферного озона сочетается с увеличением его содержания в тропосфере. Коэффициент корреляции отрицательный, равный –0,36, имеющий значимость с вероятностью 93 % по критерию Фишера говорит о незначительном преобладании фотохимического фактора стратосферно-тропосферного влияния, однако низкий коэффициент детерминации (0,13) показывает на важность и других факторов.

Анализ результатов одновременных измерений содержания озона в тропосфере и стратосфере показал, что, с одной стороны, статистически значимым является противоположное изменение количества озона в стратосфере и тропосфере. Это позволяет предположить, что фотохимические процессы локального образования

тропосферного озона могут существенно реагировать на изменения стратосферного озона с увеличением тропосферной продукции при уменьшении содержания озона в стратосфере. Однако низкий коэффициент детерминации одновременной изменчивости стратосферного и тропосферного озона говорит о многофакторности взаимодействия процессов в стратосфере и тропосфере и невозможности четкого выделения доминирующего фактора.

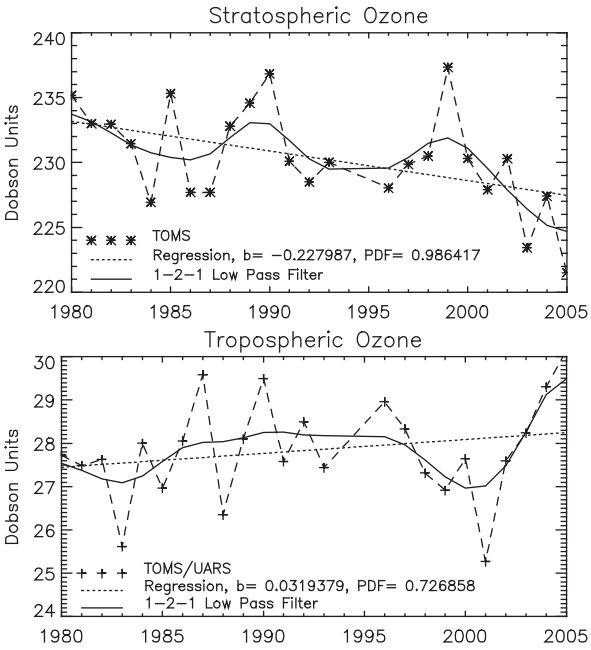


Рис. 2. Изменение стратосферного и тропосферного озона в тропических широтах по результатам спутниковых измерений TOMS и UARS

Анализ результатов спутниковых наблюдений был дополнен численным моделированием изменчивости содержания озона в стратосфере и тропосфере. На рис. 3 приведено процентное изменение содержания стратосферного и тропосферного озона по результатам модельных расчетов по отношению к уровню 70-х гг. XX в. Сплошная кривая соответствует варианту с неменяющимся от года к году стратосферным аэрозолем, то есть без учета изменчивости в результате вулканических выбросов, а пунктирная кривая показывает результаты моделирования с учетом изменчивости аэрозоля по данным SAGE [23]. Моделью воспроизводится и долгопериодная отрицательная тенденция стратосферного озона, и короткопериодные вариации, вызванные изменчивостью солнечной активности [7] (сплошная кривая) и стратосферным аэрозолем (пунктирная кривая).

Тропосферный озон в долгопериодной тенденции остается практически неизменным, что говорит о том, что на длинных временных масштабах по результатам

моделирования трудно выделить преобладающую тенденцию влияния изменений стратосферного озона на химию тропосферы. На коротких временных интервалах изменение тропосферного озона следует за изменением его стратосферного содержания. Этот результат говорит о том, что в краткосрочной перспективе влияние изменения потока из стратосферы может преобладать над локальной продукцией озона в тропосфере.

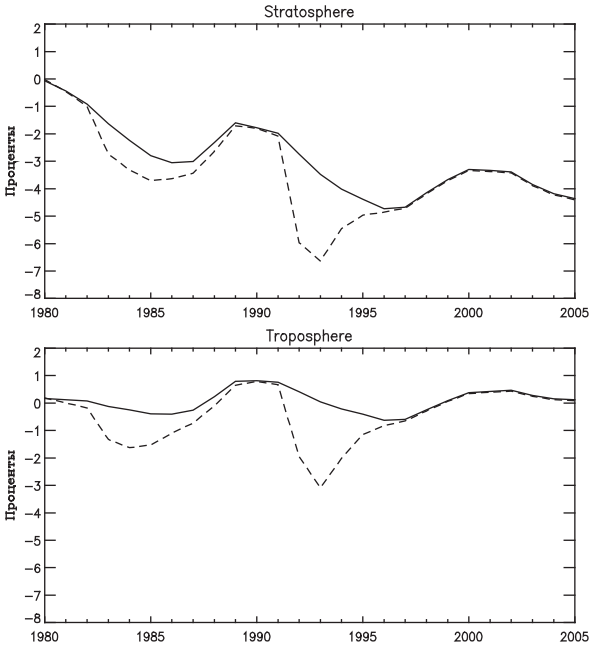


Рис. 3. Расчетное изменение стратосферного и тропосферного озона в неполярных районах

Для выяснения роли местной продукции озона в тропосфере был осуществлен анализ изменения его продукции при уменьшении содержания стратосферного озона путем сравнения результатов расчетов для двух используемых сценариев в 1993 г., когда отмечалось максимальное различие в модельных концентрациях стратосферного озона (см. рис. 3). Для этого проводилось сравнение изменчивости концентраций газов, определяющих продукцию озона в тропосфере и зависящих от количества ультрафиолетовой радиации, доходящей до тропосферы из стратосферы. Среди таких газов наиболее важными для продукции тропосферного озона являются гидроксильный радикал OH и возбужденный атомарный кислород $O(^1D)$ [17, 22].

Гидроксильный радикал OH является основным окислителем в тропосфере [17]. Его химические реакции с атмосферными газами, имеющими поверхностный источник, во-первых, определяют скорость разрушения этих газов в тропосфере, во-вторых, инициируют химические цепочки локального образования озона в тропосфере, а в-третьих, определяют, какая часть газов с поверхностными источниками попадает в стратосферу и участвует там в химических реакциях [2].

Гидроксильные радикалы образуются в атмосфере при реакциях возбужденного атомарного кислорода $O(^1D)$ с парами воды [22]:

$$O(^1D) + H_2O \rightarrow OH + OH \quad (1)$$

или с молекулярным водородом:

$$O(^1D) + H_2 \rightarrow H + OH, \quad (2)$$

а также метаном

$$O(^1D) + CH_4 \rightarrow OH + CH_3. \quad (3)$$

Таким образом, содержание гидроксильного радикала в тропосфере впрямую зависит от содержания возбужденного атомарного кислорода $O(^1D)$, который, в свою очередь, формируется в тропосфере в результате фотодиссоциации озона при поглощении солнечной радиации короче 310 нм [17]:

$$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^1D). \quad (4)$$

Интенсивность потоков солнечной радиации в тропосфере, определяющая скорость фотодиссоциации озона по этому каналу зависит от содержания стратосферного озона: чем больше содержание озона в стратосфере, тем меньше солнечных фотонов в ультрафиолетовой области доходит до тропосферы и способствует образованию возбужденного атомарного кислорода и, следовательно, гидроксила OH. С другой стороны, чем больше озона в стратосфере, тем больше его потенциально может попасть в тропосферу за счет стратосферно-тропосферного обмена массой и, следовательно, может увеличить количество образующихся из озона атомов возбужденного кислорода. Эти два процесса являются конкурирующими и для прояснения вопроса, какой из них является преобладающим, в настоящей работе проведены модельные эксперименты с химико-климатической моделью.

Скорость образования возбужденного атомарного кислорода в тропосфере в результате процесса фотолиза (4) зависит не только от интенсивности солнечной радиации, но и от содержания озона в тропосфере. Концентрация тропосферного озона определяется не только интенсивностью его притока из стратосферы, где озона существенно больше, но и балансом между его продукцией и разрушением непосредственно в тропосфере [22]. Формирование озона в тропосфере происходит в результате процессов окисления метана и других углеводородов в присутствии окислов азота [17], а его разрушение — главным образом в водородных каталитических циклах. Таким образом, увеличение продукции гидроксильных радикалов в реакции (1), с одной стороны, может привести к увеличению продукции озона при окислении углеводородов, а с другой стороны, может увеличить скорость его разрушения при химическом взаимодействии с гидроксильными радикалами.

На рис. 4 приведено расчетное изменение концентрации возбужденного атомарного кислорода $O(^1D)$, образовывавшемуся по D каналу. Прежде всего следует отметить, что в нижней стратосфере (выше 12 км по высоте) изменения $O(^1D)$ следуют тенденции

сокращения содержания стратосферного озона. В тропосфере же преобладает положительная тенденция, связанная с описанным выше механизмом увеличения потоков ультрафиолетовой радиации, достигающих высот тропосферы. Эта тенденция тем не менее в количественном отношении существенно меняется с изменением широты. Максимальное увеличение содержания O(^{1}D) отмечается в средних широтах, временами превышая 10 %, а в тропической зоне не превышает 2–3 %.

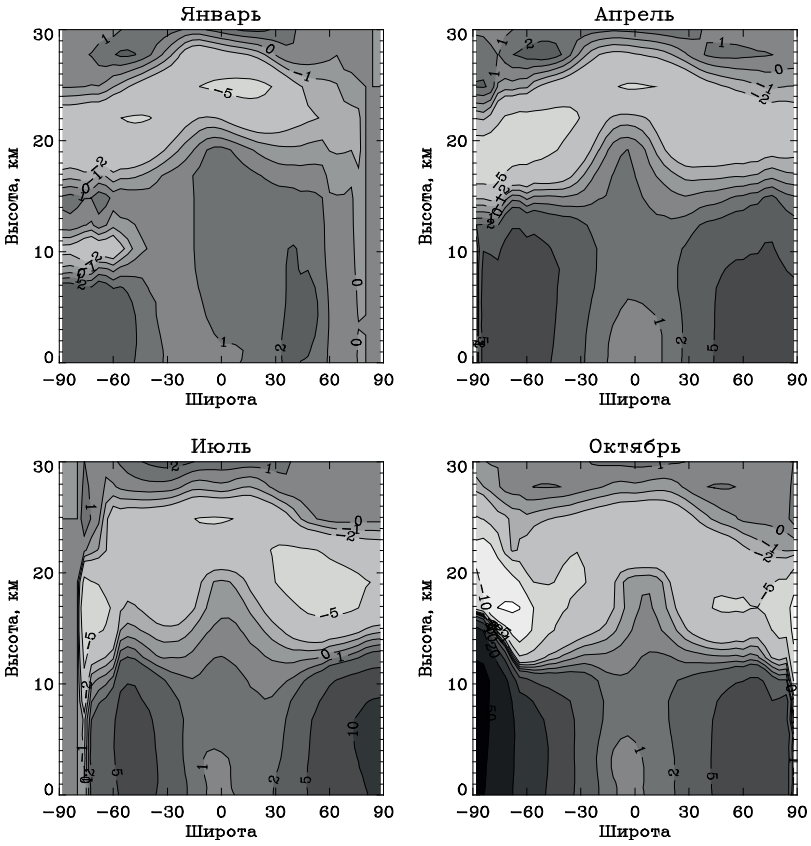


Рис. 4. Модельное процентное изменение концентрации возбужденного атомарного кислорода в 1993 г. для вариантов с учетом и без учета вулканического аэрозоля

На рис. 5 приведено процентное изменения концентрации гидроксильного радикала OH в тропосфере и в нижней стратосфере. Видно, что содержание гидроксила увеличивается в целом по тропосфере, но его увеличение почти везде несколько меньше увеличения содержания возбужденного атомарного кислорода (см. рис. 4). В изменении содержания гидроксила можно также отметить довольно существенную широтную изменчивость со значительными высотными градиентами в полярных и средних широтах.

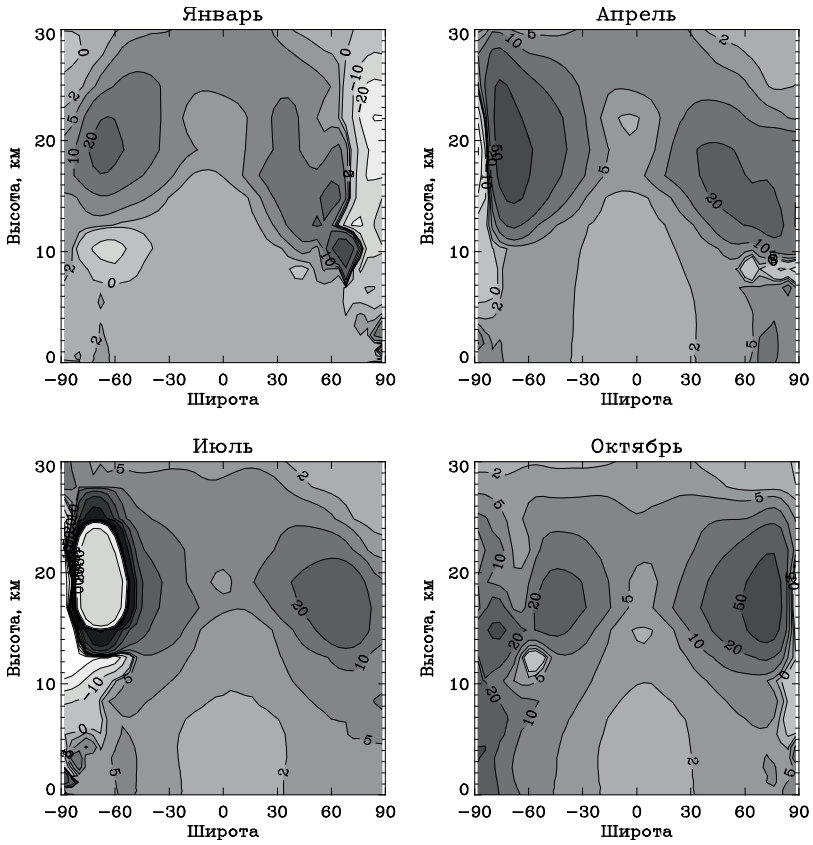


Рис. 5. Модельное процентное изменение концентрации возбужденного гидроксильного радикала OH в 1993 г. для вариантов с учетом и без учета вулканического аэрозоля

Расчетное изменение гидроксильного радикала при существенном изменении содержания стратосферного озона и его скоростей фотодиссоциации в тропосфере позволяют предположить, что реакция тропосферной химии на изменение содержания стратосферного озона является нелинейной и подвержено влиянию различных обратных связей. Разница между южным и северным полушариями возможна из-за воздействия динамических процессов глобального и регионального переноса массы, который, как известно, по-разному протекает в разных полушариях в связи с разной орографией и влиянием планетарных волн [2]. Разная изменчивость гидроксила в полярных широтах может быть обусловлена процессами формирования полярных стратосферных облаков и сопутствующими им эффектами денитрификации и дегидратации, как это описано в первой главе настоящего отчета. В тропической зоне и изменение содержание стратосферного озона и скоростей фотодиссоциации меньше, чем в средних и полярных районах, соответственно и содержание гидроксила мало реагирует на эти эффекты.

Увеличение концентрации возбужденного атомарного кислорода должно привести к интенсификации локальной продукции тропосферного озона в присутствии метановых и неметановых углеводородов, монооксиси углерода и окислов азота [17, 22]. Как показывают результаты модельных расчетов (рис. 6), действительно, продукция озона в тропосфере в результате уменьшения стратосферного озона в основном увеличивается до 5–7 % в отдельных районах. В результате этого концентрация тропосферного озона должна увеличиваться, однако, как показывают результаты выполненных в настоящей работе модельных экспериментов (рис. 7), основным эффектом в содержании озона является уменьшение его концентрации, как в стратосфере, так и в тропосфере. С учетом того, что изменение скоростей фотодиссоциации в тропосфере потенциально должно привести к увеличению содержания озона, а обмен между стратосферой и тропосферой — к уменьшению тропосферного озона в связи с сокращением озона в стратосфере, то видно, что доминирующим эффектом является второй, то есть уменьшение потока озона из стратосферы в тропосферу.

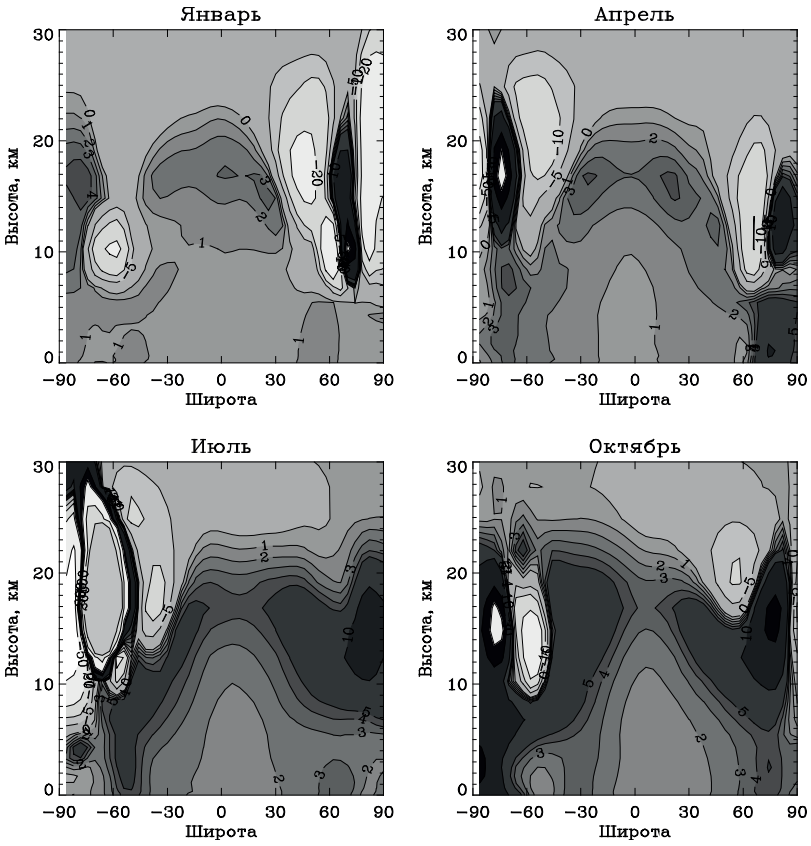


Рис. 6. Модельное процентное изменение продукции озона в 1993 г. для вариантов с учетом и без учета вулканического аэрозоля

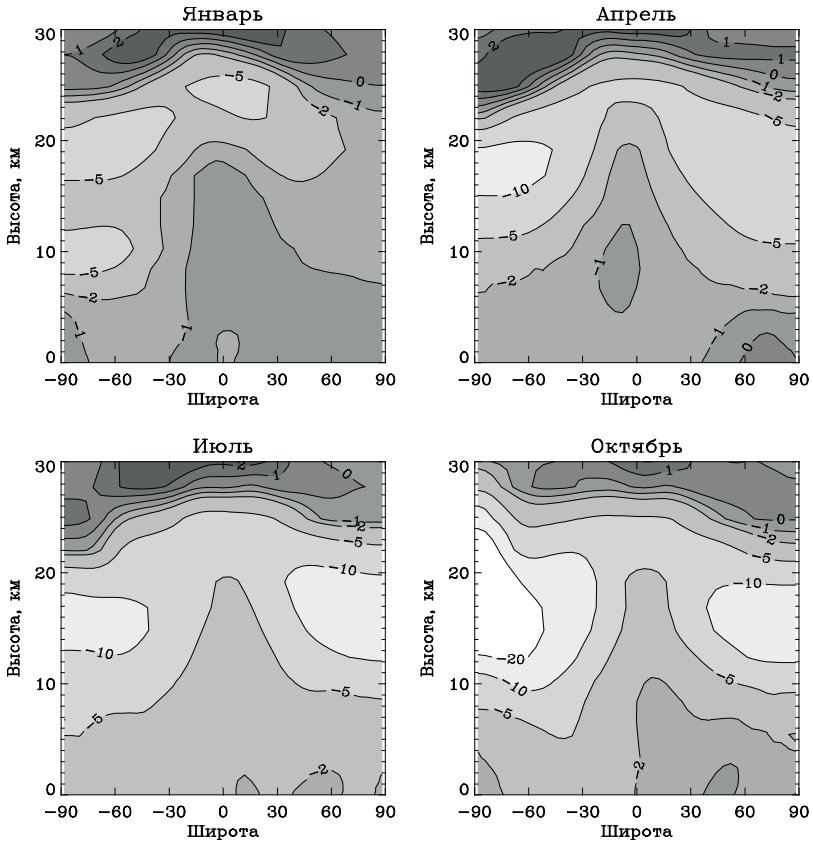


Рис. 7. Модельное процентное изменение концентрации озона в 1993 г. для вариантов с учетом и без учета вулканического аэрозоля

Заключение

В результате анализа результатов спутниковых измерений и выполнения численных экспериментов с использованием химико-климатической модели нижней и средней атмосферы, объединяющей в единый блок модели общей циркуляции и газового состава атмосферы, получены оценки влияния изменения содержания стратосферного озона на концентрацию тропосферного озона.

В ходе проведенного исследования получены следующие результаты.

При реально наблюдаемом в середине 1990-х гг. сокращении содержания стратосферного озона на 5–8 % скорости фотодиссоциации озона в тропосфере по каналу с образованием возбужденного атомарного кислорода увеличились в целом по тропосфере, а особенно в средних широтах (местами более 15 %) и в полярных широтах весной;

Соответствующее увеличение содержания возбужденного атомарного кислорода $O(^1D)$ составило от 1–2 % в тропических широтах до 10–12 % в средних широтах и более 20 % Антарктической весной.

Изменение содержания гидроксильного радикала OH, тем не менее, в этих условиях было крайне неравномерно по земному шару и сезонам: соответствующее увеличению скоростей фотодиссоциации и содержания возбужденного атомарного кислорода увеличение гидроксила в пределах 5–7 % отмечалось только зимой и весной в северном полушарии, а в остальных регионах изменение содержание гидроксила было или незначительным, или даже отрицательным, что говорит о существенной роли нелинейных эффектов и обратных связей в тропосферной химии.

Изменение концентрации тропосферного озона было результатом конкурентной борьбы двух направлений: увеличения содержания озона при увеличении скоростей окисления метана и других углеводородов и уменьшения притока озона из стратосферы в условиях сокращения содержания стратосферного озона.

Основным выводом работы по результатам анализа спутниковых измерений и проведенных модельных экспериментов является заключение о том, что, хотя продукция тропосферного озона при уменьшении его стратосферного содержания увеличивается, преобладающей тенденцией отклика тропосферного озона в этих условиях является уменьшение потока озона из стратосферы, в результате чего содержание тропосферного озона в большинстве районов или мало меняется, или уменьшается.

Литература

1. *Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я. и др.* Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. — М.: Препринт ИВМ РАН. № 2086-В98, 1998. — 180 с.
2. *Брасье Г., Соломон С.* Аэрономия средней атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 291 с.
3. *Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М.* Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв. РАН, сер. ФАО. 2007. Т. 43. № 4. — С. 347–452.
4. *Еланский Н.Ф.* Примеси в атмосфере континентальной России // Природа. 2002. № 2. — С. 32–43.
5. *Монреальский* протокол по проблеме веществ, разрушающих озонный слой // Бюллетень ВМО. 1988. Т. 37. № 2.
6. *Пановский Г.А., Брайер Г.В.* Статистические методы в метеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1967. — 242 с.
7. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Зименко П.А., Кудрявцев А.П.* Моделирование влияния изменений спектральных потоков солнечной радиации, вызванных солнечной активностью, на содержание атмосферного озона // Метеорология и гидрология. 2005. № 8. — С. 25–37.
8. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 2. — С. 211–222.
9. *Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A., Smyshlyaev S.P.* Parameterization of the convective transport in a two-dimensional chemistry-transport model and its validation with radon 222 and other tracer simulations // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, vol. 103, iss. D17, p. 22047–22062. — DOI:10.1029/98JD02084.
10. *Dvortsov V.L., Zvenigorodsky S.G., Smyshlyaev S.P.* On the use of Isaksen-Luther method of computing photodissociation rates in photochemical models // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, vol. 97, iss. D7, p. 7593–7601. —DOI:10.1029/91JD02861.
11. *Fishman J., Brackett V.G., Browell E.V., Grant W.B.* Tropospheric ozone derived from TOMS/SBUV measurements during TRACE A // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, vol. 101, iss. D19, p. 24069–24082. — DOI:10.1029/95JD03576.
12. *Fishman J., Wozniak A.E., Creilson J.K.* Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution // Atmospheric Chemistry and Physics, 2003, vol. 3, iss. 4, p. 893–907. — DOI:10.5194/acp-3-893-2003.

13. *Gates W.L.* AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project // Bulletin of the American Meteorological Society, 1992, vol. 73, iss. 12, p. 1962–1970. — DOI: http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1992)073<1962:ATAMIP>2.0.CO;2.
14. *Geller M.A., Smyshlyaev S.P.* A Model Study of Total Ozone Evolution 1979-2000 — The Role of Individual Natural and Anthropogenic Effects // Geophysical Research Letters, 2002, vol. 29, iss. 22. — DOI: 10.1029/2002GL015689.
15. *IPCC* (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2001: The Scientific Basis: Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson. — Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2001. —881 pp.
16. *Isaksen I.S.A., Zerefos C., Kourtidis K., Meleti C., Dalsøren S.B., Sundet J.K., Grini A., Zanis P., Balis D.* Tropospheric ozone changes at unpolluted and semipolluted regions induced by stratospheric ozone changes // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, vol. 110, iss. D2. — DOI:10.1029/2004JD004618.
17. *Jacob J.D.* Introduction to atmospheric chemistry. — Princeton University Press, 1999. — 264 pp.
18. *Kyoto* protocol to the United Nations framework convection on climate change // United Nations. 1998. — 21 pp.
19. *McCormick M.P., Veiga P.R.E., Chu W.P.* Stratospheric ozone profile and total ozone trends derived from the SAGE I and SAGE II data // Geophysical Research Letters, 1992, vol. 19, iss. 3, p. 269–272. — DOI: 10.1029/92GL00187.
20. *McPeters R.D, Krueger A.J., Bhartia P.K., Herman J.R. et al.* "Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide", NASA Reference Publication 1384, 1996. NASA Center for AeroSpace Information, 800 Elkridge Landing Rd, Linthicum Heights, MD 21090, USA; (301) 621-0390.
21. *Scientific* Assessment of Ozone Depletion: 1998 // WMO, Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 44, Geneva, Switzerland, 1999.
22. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change. — John Wiley and Sons, 1998. — 1203 pp.
23. *Smyshlyaev S.P., Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.* A two-dimensional model with input parameters from a GCM: Ozone sensitivity to different formulations for the longitudinal temperature variation // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, vol. 103, iss. D21, p. 28373–28387. — DOI:10.1029/98JD02354.
24. *Solomon K.R., Tang X., Wilson S.R., Zanis P., Bais A.F.* Changes in tropospheric composition and air quality due to stratospheric ozone depletion // Photochemical & Photobiological Sciences, 2003, vol. 2, iss. 1, p. 62–67. — DOI:10.1039/B211086E.
25. *The Vienna* Convention for the Protection of the Ozone Layer, 1985.
26. *WMO*, 2006: Scientific assessment of ozone depletion: WMO: Global ozone research and monitoring project — Report 47, Geneva, Switzerland. 2007. — 498 pp.
27. *Ziemke J.R., Chandra S., Bhartia P.K.* Two new methods for deriving tropospheric column ozone from TOMS measurements: The assimilated UARS MLS/HALOE and convective-cloud differential techniques // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, vol. 103, iss. D17, p. 22115–22127. — DOI:10.1029/98JD01567.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете при поддержке Российского научного фонда (проект 14-17-00096). Учет влияния изменчивости солнечной радиации на состав атмосферы проводился при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-00871-а).

А.А. Шермухамедов, У.А. Шермухамедов

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ КОНЦЕНТРАЦИИ ТРОПОСФЕРНЫХ ГАЗОВ

A.A. Shermukhamedov, U.A. Shermukhamedov

DESIGN PROCEDURE AND CRITERIA FOR EVALUATING THE NONLINEAR MODEL OF CONCENTRATIONS OF TROPOSPHERIC GASES

В статье даны методика расчета и критерии равновесного, колебательного и хаотического поведения нелинейной модели тропосферных газов, включающая в себя химические реакции семи элементов: CO, O_3, NO, NO_2, HO, HO_2 и CH_4, при изменении эмиссии оксида азота F_{NO} (молекула/см^{3}с). Показано, что в интервале значений $10^3 < F_{NO} < 7{,}98\times10^4$ модель является равновесной, при $7{,}99\times10^4 < F_{NO} < 1{,}1\times10^5$ переходит в форму периодического колебания, далее при $1{,}1\times10^5 \leqslant F_{NO}$ через каскад удвоений переходит в апериодический (хаотический) аттрактор.

Ключевые слова: нелинейные модели, тропосферные газы, жесткие системы, обыкновенные дифференциальные уравнения, устойчивость, колебания, хаос.

In article the design procedure and criteria of steady, oscillatory and chaotic behaviour of nonlinear model of the tropospheric gases, including chemical reactions of seven elements: CO, O_3, NO, NO_2, HO, HO_2 and CH_4, at issue change nitrogen oxide F_{NO} (molecule/sm^{3}s) are given. It is shown, that in the range of values $10^3 < F_{NO} < 7{,}98\times10^4$ the model is steady, at $7{,}99\times10^4 < F_{NO} < 1{,}1\times10^5$ passes in the form of periodic oscillation, further at $1{,}1\times10^5 \leqslant F_{NO}$ through bifurcations passes in aperiodic (chaotic) attractor.

Keywords: nonlinear models, tropospheric gases, rigid systems, ordinary differential equations, stability, oscillation, chaos.

В последние десятилетия в мире большое беспокойство вызывает резкое уменьшение озона в стратосфере и его увеличение в тропосфере.

Появление или исчезновение озона вызваны процессами, которые являются различными в стратосфере и в тропосфере. Так, если антропогенное влияние приводит к потере озона в стратосфере (хлорин, бромин), то для тропосферы, наоборот, NOx, CO и эмиссия углеводородов приводят к увеличению озона, что создает опасность для человека и других форм жизни.

Тенденция в исследовании тропосферного озона состоит в учете различных факторов, влияющих на изменения его концентрации.

В работе [3] приводится модель для тропосферного озона и соответствующих его химических предшественников, включающая в себя 85 видов газов, 12 основных видов аэрозолей, 39 фотолизных реакций и 157 газофазных реакций. В работе [4] предлагается модифицированная модель для озона и его предшественников с учетом стратосферной химии. Модифицированная модель включает 87 видов газов, 16 основных видов аэрозолей, 41 фотолизную реакцию и 180 газофазных реакций.

В работе [5] на основе сопоставительного анализа результатов расчета концентрации тропосферного озона, полученного на основе модифицированной модели [4] с данными измерения в различных точках Земли, показано, что отклонения данных доходит до 25 %. Это объясняется сложностью учета изменения таких элементов, как CO и NO_x.

В связи с этим определенный интерес вызывает поведения модели тропосферного озона при предположении неограниченного притока NO_x, основными источниками которого являются такие естественные процессы, как молнии, лесные пожары и процессы вследствие человеческой деятельности, такие как выбросы продуктов горения тепловых электростанций, двигателей внутреннего сгорания и др. Выберем для этого упрощенную модель тропосферного озона, предложенного в работе [6]. Модель включает в себя следующие химические элементы: CO, O_3, NO, NO_2, HO, HO_2 и CH_4, участвующие в химических реакциях, показанных в табл. 1. Поведение рассматриваемой модели исследуется изменением притока NO_x (F_{NO}), все другие параметры считаются постоянными и принимают значения согласно данным табл. 1. Покажем, что постепенное увеличение F_{NO} последовательно приводит от устойчивого равновесного состояния модели к периодическому колебанию, удваиванию периода и далее к хаосу. Концентрации O_2 и H_2O приняты постоянными.

Таблица 1

Модель тропосферной химии

№	Реакция			Норма параметра	Значение
R1	источник	→	CO	F_{CO}, молекула/см^{3}с	$5{,}0 \times 10^5$
R2	источник	→	O_3	F_{O3}, молекула/см^{3}с	$6{,}0 \times 10^4$
R3	источник	→	NO	F_{NO}, молекула/см^{3}с	переменное
R4	$O_3 + h\nu$	$\xrightarrow{H_2O}$	$2HO + \{O_2\}$	k_{R4}, с$^{-1}$	$6{,}9 \times 10^{-8}$
R5	HO + CO	$\xrightarrow{O_2}$	$HO_2 + \{CO_2\}$	k_{R5}, молекула/см^{3}с	$1{,}9 \times 10^{-13}$
R6	$HO_2 + O_3$	→	$HO + \{2O_2\}$	k_{R6}, молекула/см^{3}с	$1{,}5 \times 10^{-15}$
R7	$NO + O_3$	→	$NO_2 + \{O_2\}$	k_{R7}, молекула/см^{3}с	$7{,}9 \times 10^{-15}$
R8	$NO_2 + h\nu$	$\xrightarrow{O_2}$	$NO + O_3$	k_{R8}, с$^{-1}$	$3{,}9 \times 10^{-3}$
R9	$HO_2 + NO$	→	$HO + NO_2$	k_{R9}, молекула/см^{3}с	$9{,}6 \times 10^{-12}$
R10	$HO + NO_2$	→	$\{HNO_3\}$	k_{R10}, молекула/см^{3}с	$1{,}3 \times 10^{-11}$
R11	$HO_2 + HO_2$	→	$H_2O_2 + \{O_2\}$	k_{R11}, молекула/см^{3}с	$2{,}9 \times 10^{-12}$
R12	$HO + O_3$	→	$HO_2 + \{O_2\}$	k_{R12}, молекула/см^{3}с	$7{,}0 \times 10^{-14}$
R13	$CH_4 + HO$	$\xrightarrow{2O_2}$	$CO + HO_2 + \{2H_2O\}$	k_{R13}, молекула/см^{3}с	$1{,}0 \times 10^{-16}$
R14	NO	→		L_{NO}, молекула/см^{3}с	$1{,}9 \times 10^{-8}$
R15	NO_2	→		L_{NO2}, молекула/см^{3}с	$7{,}2 \times 10^{-8}$
R16	O_3	→		L_{O3}, молекула/см^{3}с	$9{,}6 \times 10^{-8}$
R17	источник	→	CH_4	F_{CH4}, молекула/см^{3}с	$4{,}2 \times 10^{13}$

Система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих поведение динамических концентраций, имеет вид:

$$
\begin{aligned}
&\frac{d[\mathrm{CO}]}{dt} = k_{R13}[\mathrm{CH_4}][\mathrm{HO}] - k_{R5}[\mathrm{CO}][\mathrm{HO}] + F_{\mathrm{CO}},\\
&\frac{d[\mathrm{O_3}]}{dt} = k_{R8}[\mathrm{NO_2}] - k_{R4}[\mathrm{O_3}] - k_{R6}[\mathrm{HO_2}][\mathrm{O_3}] - k_{R7}[\mathrm{NO}][\mathrm{O_3}] - k_{R12}[\mathrm{HO}][\mathrm{O_3}] - L_{\mathrm{O3}}[\mathrm{O_3}] + F_{\mathrm{O3}},\\
&\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt} = k_{R8}[\mathrm{NO_2}] - k_{R7}[\mathrm{NO}][\mathrm{O_3}] - k_{R9}[\mathrm{HO_2}][\mathrm{NO}] - L_{NO}[\mathrm{NO}] + F_{NO},\\
&\frac{d[\mathrm{NO_2}]}{dt} = k_{R7}[\mathrm{NO}][\mathrm{O_3}] + k_{R9}[\mathrm{HO_2}][\mathrm{NO}] - k_{R8}[\mathrm{NO_2}] - k_{R10}[\mathrm{HO}][\mathrm{NO_2}] - L_{NO2}[\mathrm{NO_2}],\\
&\frac{d[\mathrm{HO}]}{dt} = 2k_{R4}[\mathrm{O_3}] + k_{R6}[\mathrm{HO_2}][\mathrm{O_3}] + k_{R9}[\mathrm{HO_2}][\mathrm{NO}] - k_{R5}[\mathrm{HO}][\mathrm{CO}] - k_{R10}[\mathrm{HO}][\mathrm{NO_2}] -\\
&\qquad -k_{R12}[\mathrm{HO}][\mathrm{O_3}] - k_{R13}[\mathrm{CH_4}][\mathrm{HO}],\\
&\frac{d[\mathrm{HO_2}]}{dt} = k_{R5}[\mathrm{HO}][\mathrm{CO}] + k_{R12}[\mathrm{HO}][\mathrm{O_3}] + 2k_{R13}[\mathrm{CH_4}][\mathrm{HO}] - k_{R6}[\mathrm{HO_2}][\mathrm{O_3}] -\\
&\qquad -k_{R9}[\mathrm{HO_2}][\mathrm{NO}] - k_{R11}[\mathrm{HO_2}][\mathrm{HO_2}],\\
&\frac{d[\mathrm{CH_4}]}{dt} = -k_{R13}[\mathrm{CH_4}][\mathrm{HO}].
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Элементы HNO_3, H_2O_2 и CO_2 являются продуктами реакции и не фигурируют в приведенных уравнениях.

Систему дифференциальных уравнений (1), используя преобразование $u \equiv [\mathrm{CO}]$, $v \equiv [\mathrm{O_3}]$, $x \equiv [\mathrm{NO}]$, $w \equiv [\mathrm{NO_2}]$, $y \equiv [\mathrm{HO}]$, $z \equiv [\mathrm{HO_2}]$, $s \equiv [\mathrm{CH_4}]$, $F_1 \equiv F_{\mathrm{CO}}$, $F_2 \equiv F_{\mathrm{O3}}$, $F_3 \equiv F_{\mathrm{NO}}$, $L_1 \equiv L_{\mathrm{NO}}$, $L_2 \equiv L_{\mathrm{NO2}}$ и $L_3 \equiv L_{\mathrm{O3}}$, можно записать в более удобном виде:

$$
\begin{aligned}
&\frac{du}{dt} = k_{R13}sy - k_{R5}uy + F_1,\\
&\frac{dv}{dt} = k_{R8}w - k_{R4}v - k_{R6}zv - k_{R7}xv - k_{R12}yv - L_3v + F_2,\\
&\frac{dx}{dt} = k_{R8}w - k_{R7}wv - k_{R9}zx - L_1x + F_3,\\
&\frac{dw}{dt} = k_{R7}xv + k_{R9}zx - k_{R8}w - k_{R10}yw - L_2w,\\
&\frac{dy}{dt} = 2k_{R4}v + k_{R6}zv + k_{R9}zx - k_{R5}yu - k_{R10}yw - k_{R12}yv - k_{R13}sy,\\
&\frac{dz}{dt} = k_{R5}yu + k_{R12}yv + 2k_{R13}sy - k_{R6}zv - k_{R9}zx - k_{R11}z^2,\\
&\frac{ds}{dt} = -k_{R13}sy.
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

Эффективность численного решения в значительной степени определяется спектром матрицы Якоби системы (2) [1]. Сложность задачи можно оценить величиной pH, где p — спектральный радиус матрицы Якоби, H — величина интервала интегрирования. При умеренных значениях pH (нежесткие задачи) интегрирование обычно выполняется традиционными явными методами и требует небольших вычислительных затрат. Трудности возникают при больших значениях pH (жесткие задачи), когда для получения правильного решения бывает необходимо выбирать очень малый шаг интегрирования [2].

На основе анализа различных методов по влиянию жесткости задачи на точность ее решения и вычислительные затраты авторы работы [1] подтвердили, что наиболее приемлемыми являются неявные методы, а среди них эффективнее других является метод Гира.

Запишем систему (2) в матричной форме

$$\frac{dX_i}{dt} = AX_i,$$

где матрица A имеет вид

$$\begin{pmatrix}
-k_{R5}y_0 & 0 & 0 & 0 & k_{R13}s_0 - k_{R5}u_0 & 0 & k_{R13}y_0 \\
0 & -k_{R4} - k_{R6}z_0 - k_{R7}x_0 - k_{R12}y_0 & -k_{R7}v_0 & k_{R8} & -k_{R12}v_0 & -k_{R6}v_0 & 0 \\
0 & -k_{R7}v_0 & -k_{R9}z_0 & k_{R8} & 0 & -k_{R9}x_0 & 0 \\
0 & k_{R7}x_0 & k_{R7}v_0 + k_{R9}z_0 & -k_{R8} - k_{R10}y_0 & -k_{R10}w_0 & k_{R9}x_0 & 0 \\
-k_{R5}u_0 & 2k_{R4} + k_{R6}z_0 - k_{R12}y_0 & k_{R9}z_0 & k_{R10}y_0 & -k_{R5}u_0 - k_{R10}w_0 - k_{R12}v_0 - k_{R13}s_0 & k_{R6}v_0 + k_{R9}x_0 & -k_{R13}y_0 \\
k_{R5}u_0 & k_{R12}y_0 - k_{R6}z_0 & -k_{R9}z_0 & 0 & k_{R5}u_0 + k_{R12}v_0 + 2k_{R13}s_0 & -k_{R6}v_0 - k_{R9}x_0 - 2k_{R11} & 2k_{R13}y_0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -k_{R13}s_0 & 0 & -k_{R13}y_0
\end{pmatrix} \quad (3)$$

Результаты расчета показали, что собственное число системы (3) составляет $1{,}55 \times 10^{+8}$, то есть система является очень жесткой.

Для решения системы дифференциальных уравнений (2) используем метод Гира и ode15s программной среды Matlab®7.11.0(R2010b).

Нами рассмотрены критерии равновесного, колебательного и хаотического поведения концентрации тропосферных газов при различных значениях F_{NO}. Расчеты показали, что в интервале значений $10^3 < F_{NO} \leqslant 7{,}98 \times 10^4$ (молекула/см^{3}с) система является равновесной и стремится к узловой точке.

На рис. 1 и 2 приведена зависимость [O_3] от [CO] и от времени при $F_{NO} = 7{,}98 \times 10^4$ молекула/см^{3}с. Анализ рисунков показывает, что зависимость имеет характер затухающего колебания и стремится к значению $5{,}755 \times 10^{11}$ молекула/см^3.

Дальнейшее увеличение FNO нарушает равновесное (устойчивое) состояние, происходит колебательный процесс, далее — удвоение периода, то есть бифуркация, каскад бифуркаций с переходом к хаотическому поведению.

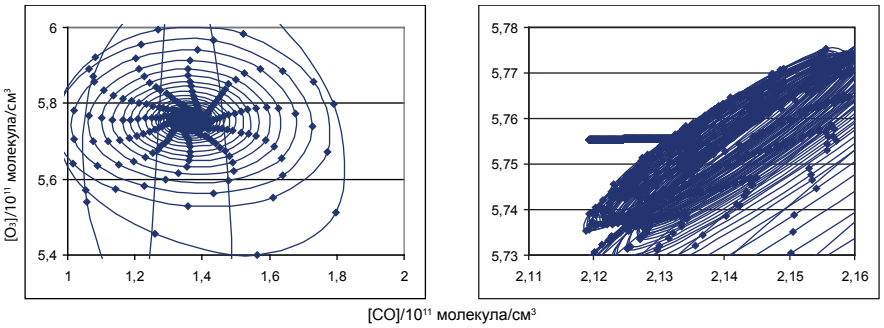


Рис. 1. Фазовый портрет зависимости [O₃] от [CO] при $F_{NO} = 7{,}98 \times 10^4$ молекула/см³с

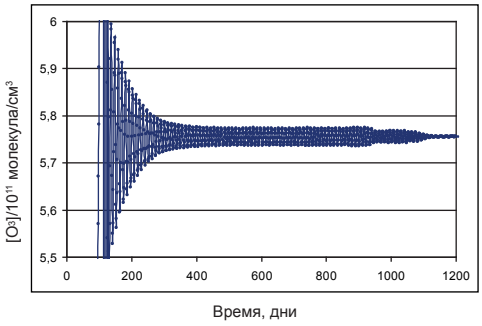


Рис. 2. Зависимость изменения [O₃] от времени при $F_{NO} = 7{,}98 \times 10^4$ молекула/см³с

Рассмотрим этот процесс на основе решаемой задачи.

Для значений F_{NO}: $7{,}99 \times 104 \leqslant F_{NO} < 1{,}1 \times 105$ (молекула/см³с) система имеет колебательный переходный процесс и стремится к предельному циклу. На рис. 3 и 4 показаны колебания, полученные для $F_{NO} = 7{,}99 \times 10^4$ молекула/см³с и $F_{NO} = 8{,}5 \times 10^4$ молекула/см³с.

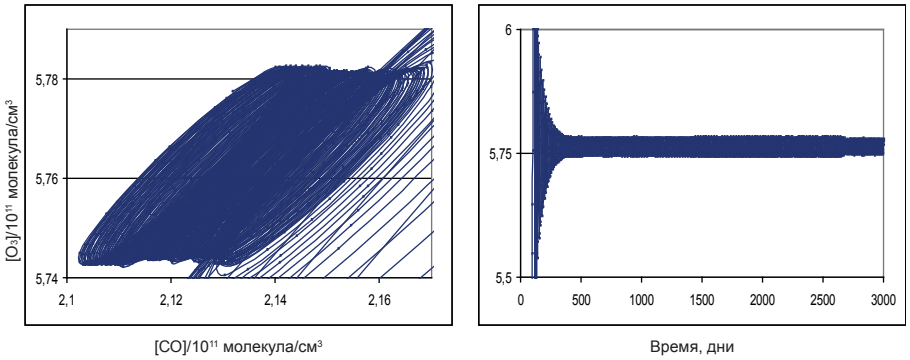


Рис. 3. Зависимости изменения [O₃] при $F_{NO} = 7{,}99 \times 10^4$ молекула/см³с

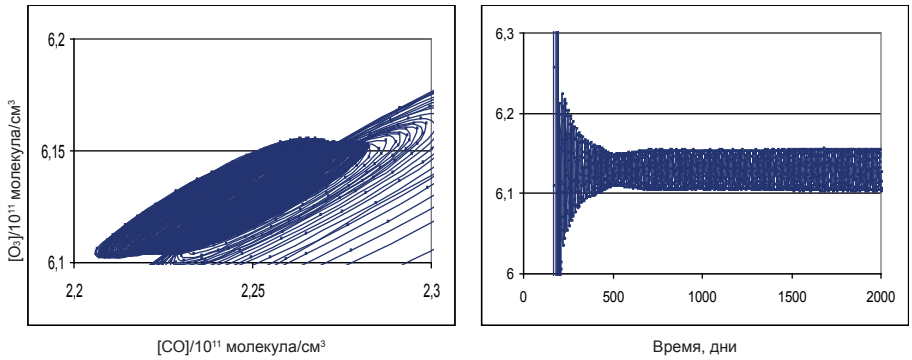


Рис. 4. Зависимости изменения [O₃] при $F_{NO} = 8{,}5 \times 10^4$ молекула/см³с

Для $1{,}1 \times 10^5 \leqslant F_{NO}$ происходит бифуркация (удвоение) предельных циклов (рис. 5), далее через каскад удвоений (рис. 6) модель переходит в апериодический (хаотический) аттрактор (рис. 7).

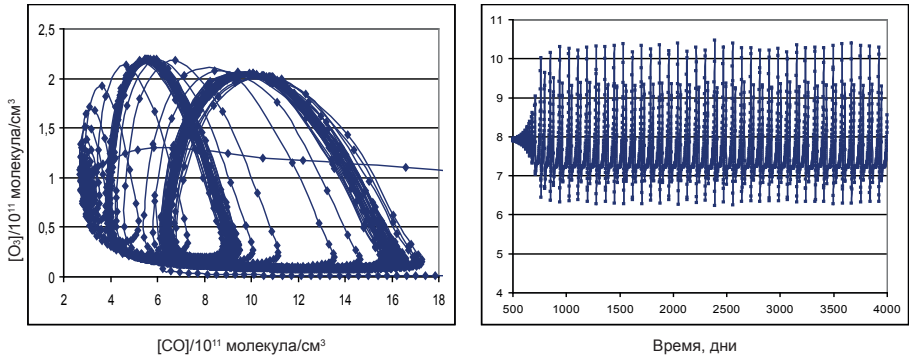


Рис. 5. Зависимости изменения [O₃] при $F_{NO} = 1{,}1 \times 10^5$ молекула/см³с

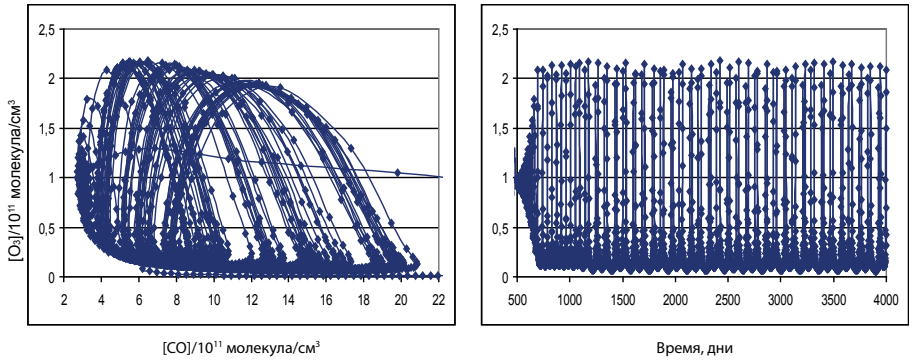


Рис. 6. Зависимости изменения [O₃] при $F_{NO} = 1{,}13 \times 10^5$ молекула/см³с

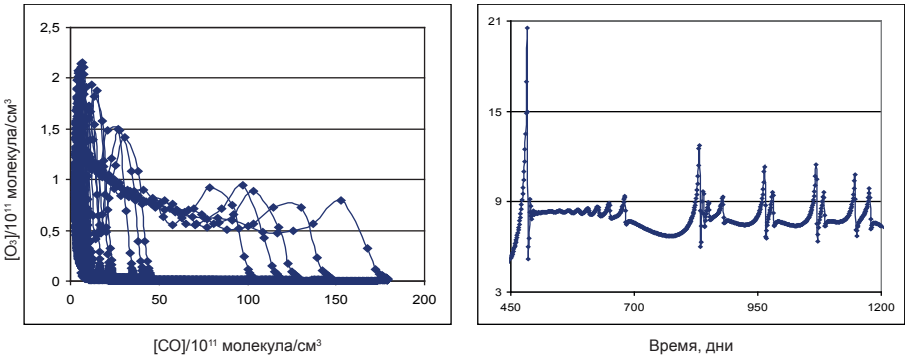


Рис. 7. Зависимости изменения [O_3] при $F_{NO} = 1{,}16 \times 10^5$ молекула/см^{3}с

Таким образом, результаты исследования равновесного, колебательного и хаотического поведения нелинейной модели тропосферной химии при изменении эмиссии оксида азота F_{NO} (молекула/см^{3}с) показали, что в интервале значений $10^3 < F_{NO} \leqslant 7{,}98 \times 10^4$ (молекула/см^{3}с) модель является равновесной и стремится к узловой точке, в интервале значений $7{,}99 \times 10^4 < F_{NO} < 1{,}1 \times 10^5$ модель становится колебательной со стремлением к предельным циклам, при $1{,}1 \times 10^5 \leqslant F_{NO}$ через каскад удвоений переходит в апериодический (хаотический) аттрактор.

Литература

1. *Козлов О.С., Скворцов Л.М., Ходаковский В.В.* Решение дифференциальных и дифференциально-алгебраических уравнений в программном комплексе «МВТУ» [Электронный ресурс]. — URL: http://model.exponenta.ru/mvtu/20051121.html
2. *Хайрер Э., Ваннер Г.* Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. — М.: Мир, 1999.
3. *Emmons L.K., Walters S., Hess P.G., Lamarque J.-F. et al.* Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4) // Geoscientific Model Development, 2010, vol. 3, iss. 1, p. 43–67. — DOI:10.5194/gmd-3-43-2010.
4. *Lamarque J.-F., Emmons L.K., Hess P.G. et al.* CAMchem: description and evaluation of interactive atmospheric chemistry in the Community Earth System Model // Geoscientific Model Development, 2012, vol. 5, iss. 2, p. 369–411. — DOI:10.5194/gmd-5-369-2012.
5. *Tilmes S., Lamarque J.-F., Emmons L.K. et al.* Description and evaluation of tropospheric chemistry and aerosols in the Community Earth System Model (CESM 1.2) // Geoscientific Model Development, 2015, vol. 8, iss. 5, p. 1395–1426. — DOI:10.5194/gmd-8-1395-2015.
6. *Tinsley M.R., Field R.J.* Dynamic instability in tropospheric photochemistry: An excitability threshold // Geophysical Research Letters, 2001, vol. 28, iss. 23, p. 4437–4440. — DOI:10.1029/2001GL013675.

Д.В. Рябчук, А.Ю. Сергеев, О.А. Ковалева, И.О. Леонтьев, В.А. Жамойда, А.М. Колесов

ПРОБЛЕМЫ АБРАЗИИ БЕРЕГОВ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА: СОСТОЯНИЕ, ПРОГНОЗ, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО БЕРЕГОЗАЩИТЕ

D.V. Ryabchuk, A.Yu. Sergeev, O.A. Kovaleva, I.O. Leont'ev, V.A. Zhamoida, A.M. Kolesov

PROBLEMS OF COASTAL EROSION IN THE EASTERN GULF OF FINLAND: STATE, PROGNOSIS OF DEVELOPMENT, RECOMMENDATIONS ON COAST PROTECTION

Берега восточной части Финского залива характеризуются интенсивным развитием абразионных процессов. Ежегодный мониторинг состояния береговой зоны позволил выявить основные геолого-геоморфологические предпосылки активного развития абразии, а также гидрометеорологические факторы, контролирующие экстремальные размывы берегов. Установлена зависимость интенсивности абразии от изменений климата, выполнен прогноз скоростей отступания берега при различных сценариях климатических изменений.

Ключевые слова: береговая зона, Финский залив, абразия, изменения климата.

Coasts of the Eastern Gulf of Finland are characterized by intense erosion processes. Annual coastal zone monitoring allowed to establish the main geological and geomorphological reasons of active coastal erosion, as well as hydrometeorological driving forces of extreme erosion events. Links of erosion intensity with climate change were find, and prognosis of coastal zone development under different climate change scenarios is presented.

Keywords: Coastal zone, Gulf of Finland, erosion, climate change.

Введение

Берега восточной части Финского залива обладают большой рекреационной ценностью, поэтому отмечающаяся в последнее десятилетие активизация опасных экзогенных геологических процессов, к которым прежде всего относится береговая абразия, привлекает к себе пристальное внимание как специалистов, так и природопользователей.

Для разработки и успешного осуществления эффективных мер по берегозащите наиболее ценных в рекреационном отношении участков берегов необходимы понимание причин происходящих процессов и прогноз их дальнейшего развития. Особую

актуальность указанные проблемы приобретают в контексте возможных климатических изменений.

Фактический материал и методы исследований

С 2000 г. специалистами ВСЕГЕИ в ежегодном режиме выполняются комплексные геолого-геоморфологические и геофизические исследования береговой зоны восточной части Финского залива в рамках проектов, осуществляемых при поддержке Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга и Федерального агентства по недропользованию. В 2011–2015 гг. основной объем работ был выполнен в рамках проектов «Государственный мониторинг состояния геологической среды (недр) прибрежно-шельфовой зоны Балтийского, Белого и Баренцева морей» и «Разработка Генеральной схемы берегозащиты Курортного района Санкт-Петербурга».

В пределах Курортного района Санкт-Петербурга эти работы включают в себя береговые маршруты, нивелировки по сети опорных профилей (в том числе, в оперативном режиме после сильных штормов), гранулометрический анализ осадков пляжа и подводного берегового склона. На прибрежных мелководьях выполнено более 1600 км профилирования методом гидролокации бокового обзора (ГЛБО) с использованием гидролокатора СМ2 (C-MAX Ltd, UK) с полосами обзора 100, 50 и 25 м с каждого борта, осуществлен такой же объем эхолотирования, более 500 км непрерывного сейсмоакустического профилирования. Для заверки геофизических данных и получения материала для лабораторных исследований применяется донный пробоотбор и подводная видеосъемка. Пробы донных осадков отбираются дночерпателем, бокс-корером и герметичной грунтовой трубкой. В 2012–2013 и 2014–2015 гг. для отдельных участков берега было выполнено лазерное сканирование (в том числе, в повторном режиме после экстремальных штормов), что позволило впервые выполнить количественную оценку объемов потери песчаного материала под воздействием абразии, а также многолучевое эхолотирование в пределах дна акватории.

Для анализа изменений гидрометеорологических факторов были использованы материалы ГУ Санкт-Петербургский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ГУ СПб ЦГМС-Р).

Благодаря длительной истории хозяйственного освоения территории Курортного района в открытом доступе имеется большое количество архивного картографического материала, что, наряду с использованием результатов аэрофотосъемки высокого разрешения, выполнявшейся в исследуемом районе НИИКАМ в 1981 и 1990 г., позволяет выполнять оценки скоростей размыва берегов с использованием ретроспективного анализа материалов дистанционного зондирования.

Характеристика интенсивности абразионных процессов северной береговой зоны Финского залива в пределах Курортного района

На всем протяжении рассматриваемой береговой зоны верхняя часть геологического разреза сложена легко поддающимися размыву четвертичными отложениями

(рис. 1). На суше они представлены верхненеоплейстоценовыми ледниковыми, озерно-ледниковыми и флювиогляциальными образованиями, а также голоценовыми морскими, озерными, эоловыми, аллювиальными отложениями и торфяниками. На дне преобладают выходы морены и голоценовые песчаные осадки. По степени устойчивости к абразии [7] эти отложения относятся к IV (морена) и V (пески, глины) классам, то есть являются неустойчивыми. В результате размыва морены на берегу и на подводном береговом склоне формируются валунные отмостки, что, с одной стороны, замедляет дальнейший размыв подводного берегового склона, но с другой стороны — является причиной резкого дефицита осадочного материала в береговой зоне [9].

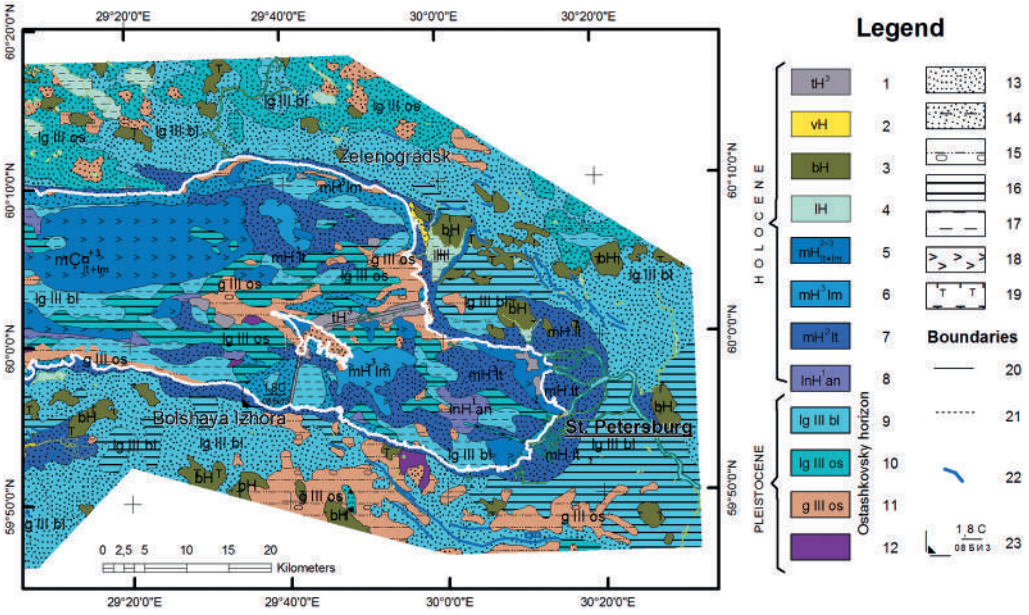


Рис. 1. Карта четвертичных отложений восточной части Финского залива.
Условные обозначения: *1–8* — отложения голоцена; *9–11* — отложения верхнего неоплейстоцена. *1* — техногенные; *2* — эоловые; *3* — биогенные; *4* — озерные; *5* — морские лимниевые; *6* — морские литориновые и лимниевые (неразделенные); *7* — морские литориновые; *8* — анциловые озерные; *9* — отложения Балтийского ледникового озера; *10* — ледниково-озерные лужской стадии; *11* — ледниковые; *12* — дочетвертичные образования; *13–19* — литотипы: *13* — пески с гравием и галькой; *14* — пески; *15* — супеси; *16* — ленточные глины; *17* — глины; *18* — илы; *19* — торф; *20* — стратиграфические границы; *21* — литологические границы; *22* — реликтовые береговые валы, косы и бары; *23* — места отбора проб для радиоуглеродного датирования (возраст в тыс. л.н., метод/номер образца) [1]

Побережья Курортного района в настоящее время находятся в зоне слабых восходящих гляциоизостатических движений (около 1 мм/год) и стабильного относительного уровня моря [10, 12]. Важно отметить, однако, что, по данным измерений в Кронштадте [3], с 1946 г. уровень начал довольно интенсивно расти со скоростью 1,9 мм/год.

Дополнительными факторами, способствующими активному развитию абразии, являются выявленные в ходе морских геолого-геофизических работ особенности рельефа прибрежных мелководий — постепенно размывающийся край подводной прибрежной террасы, существование которой несколько снижает волновое воздействие на берега, а также эрозионные ложбины стока, представляющие собой вытянутые в юго-западном направлении понижения рельефа дна длиной до нескольких сот метров, шириной 10–20 м и относительной глубиной до 1 м, по которым происходит вынос песчаного материала компенсационными течениями в сторону моря при сильных штормах [9].

Таким образом, геологическое строение, рельеф и тектонический режим береговой зоны Курортного района создают предпосылки для активного развития абразионных процессов. Результатом является преобладание абразионных и аккумулятивно-абразионных подтипов (более 60 %) среди морфогенетических типов берегов Курортного района (рис. 2). По данным ретроспективного анализа материалов дистанционного зондирования, средняя многолетняя скорость отступания берегов за период 1981–2005 гг. составляет 0,25–0,5 м/год [9].

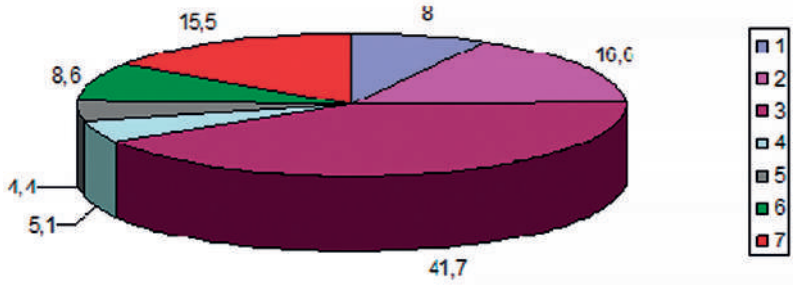


Рис. 2. Диаграмма распределения типов берегов Курортного района.
Условные обозначения: подтипы берегов: *1* — аккумулятивный песчаный, выравнивающийся мелкобухтовый; *2* — аккумулятивно-абразионный (аккумулятивный песчаный пляж с абразионными формами рельефа на подводном береговом склоне); *3* — абразионный моренный, мелкобухтовый; *4* — абразионный песчаный, мелкобухтовый; *5* — техногенный; *6* — аккумулятивный илистый с развитием водной растительности на подводном береговом склоне; *7* — выровненный аккумулятивный песчаный

Важнейшей особенностью развития абразионных процессов в восточной части Финского залива является их цикличность. Исследования и мониторинг состояния берегов позволили выявить комплекс гидрометеорологических факторов, контролирующих экстремальные размывы берегов. По данным повторных нивелировок было установлено, что скорость отступания абразионного уступа в дюнах может достигать 5 м за один шторм, что осенью–зимой 2011 г. привело к отступанию авандюны в пос. Комарово на расстояние до 10 м. Наиболее сильные размывы берегов происходят при сочетании трех факторов: подъема уровня воды, штормовых ветрах западного и юго-западного направлений и отсутствия ледового покрова. В наших работах [9, 16] приведен детальный анализ гидрометеорологических данных за 2000–2011 гг. и их сопоставление с наблюдениями за интенсивностью абразионных процессов.

Данный по результатам наблюдений прогноз подтвердился в 2012–2015 гг. Осенью 2012 г. при прохождении октябрьских и ноябрьских циклонов уровень подъема воды не превышал 140 см. Значительных размывов берегов зафиксировано не было, наблюдалось медленное восстановление авандюн. Осень 2013 г., напротив, характеризовалась исключительной активностью циклонических процессов. Наиболее штормовым в этой серии оказался циклон, зародившийся в северной Атлантике 28 октября и сместившийся с большой скоростью — 80–90 км/ч к южной Балтике. По мере своего продвижения на восток и углубления циклон превратился в ураган, который в европейских странах получил название «Святой Иуда». Утром и днем 29 октября по мере продвижения циклона по территории Южной Финляндии и Карелии скорость его снизилась до 60 км/ч. Усиление ветра с приближением этого циклона отмечалось на всей территории Северо-Запада — от Калининграда до Республики Карелия. Порывы ветра на большей части региона достигали от 16 до 24 м/с, а на акватории Финского залива превышали критерий опасного явления, достигая 25–28 м/с. Очень сильный ветер юго-западного, западного направлений способствовал нагону воды в Финский залив и создал угрозу наводнения в Санкт-Петербурге. Ввиду возможности опасного подъема воды утром 29 октября Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) был полностью закрыт и оставался в таком состоянии до 19 ч. Максимальный подъем уровня воды у гидрологического поста «Горный институт» к 15 ч составил 120 см, а к западу от КЗС — до 190–210 см.

Практически в течение всего ноября циклоны продолжали следовать через Балтийское море и территорию Финского залива. Усиления ветра, преимущественно западных направлений, наблюдались ежедневно на большей части Ленинградской области. В течение месяца было отмечено тринадцать дней с порывами ветра 12–16 м/с, до семи дней — с порывами 17–24 м/с. Наиболее сильный ветер наблюдался 17 ноября, когда глубокий циклон быстро сместился с центральных районов норвежского побережья к Архангельску. В его южной, а затем и в тыловой части произошло усиление западного, северо-западного ветров до 25–28 м/с. Очень сильный ветер отмечался по территории Ленинградской области и на акватории Финского залива. В Санкт-Петербурге в связи с влиянием этого циклона создалась угроза очередного наводнения, которое было предотвращено после закрытия КЗС. Уровень воды в устье р. Невы вечером 17 ноября повысился до 135 см. В последнем месяце года наиболее сильный ветер наблюдался 13 декабря, когда штормовой циклон быстро сместился с норвежского побережья севернее Санкт-Петербурга. Усиление ветра западного направления до 25–26 м/с наблюдалось на акватории Финского залива. В течение месяца уровень воды в Невской губе оставался повышенным, постоянно поднимаясь до +100...+130 см и опускаясь в отдельные периоды до +20...+50 см.

В результате воздействия штормов вновь на всем протяжении пояса береговых дюн сформировался активный абразионный уступ, рекреационной инфраструктуре был нанесен значительный ущерб (рис. 3).

Механизм воздействия экстремальных штормов на профиль пляжа для участка берега в пос. Комарово удалось проследить благодаря выполненному в рамках совместного российско-финляндского проекта CliPLivE («Адаптация городской окружающей среды к негативным последствиям климатических изменений») Программы

«Юго-Восточная Финляндия — Россия» лазерному сканированию. Измерения в повторном режиме (осень 2012 г., в период стабилизации пляжа, и осень 2013 г., непосредственно после серии штормов) показали, что под воздействием шторма происходит активный вынос песчаного материала из тыловой части пляжа, сопровождающийся отступанием абразионного уступа (рис. 4).

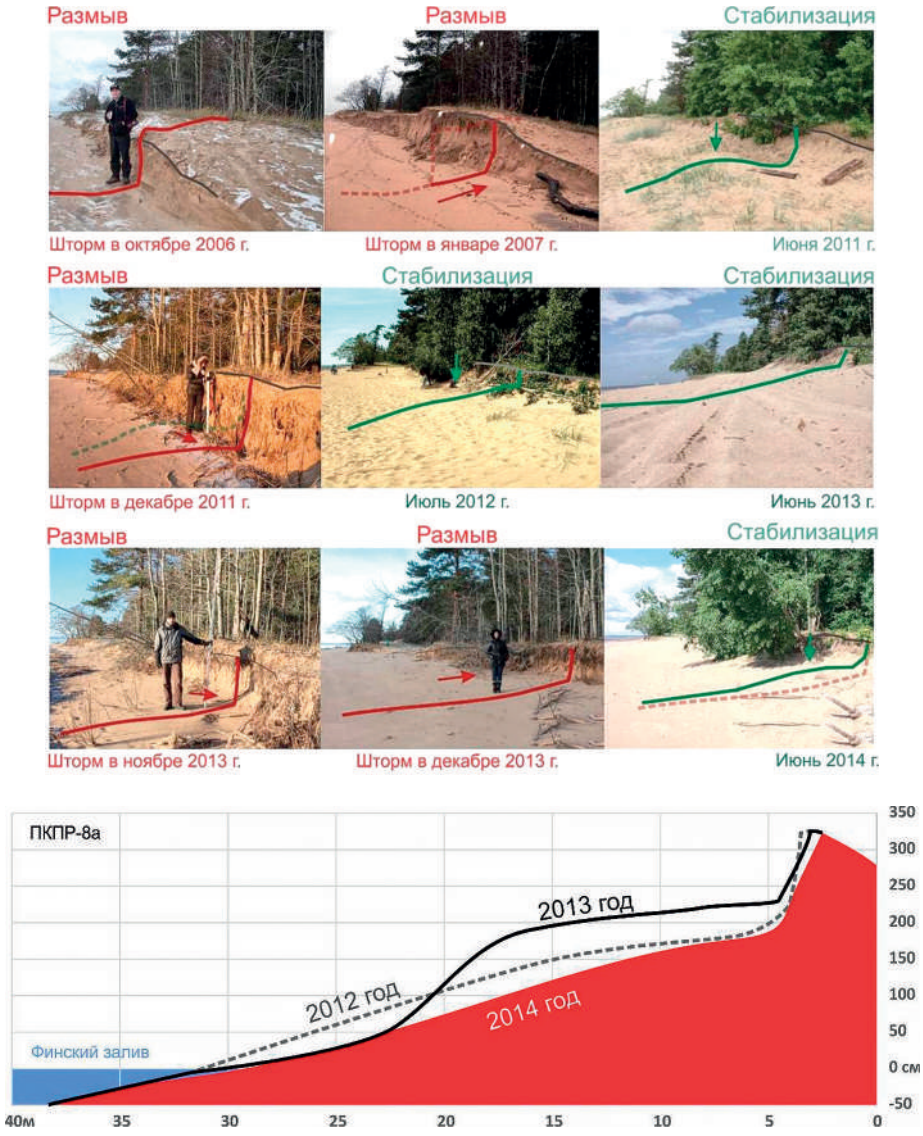


Рис. 3. Чередование процессов размыва и стабилизации в период с 2006 по 2014 г. и результаты повторных нивелировок за 2012–2014 гг. (опорный профиль 8а, пос. Комарово)

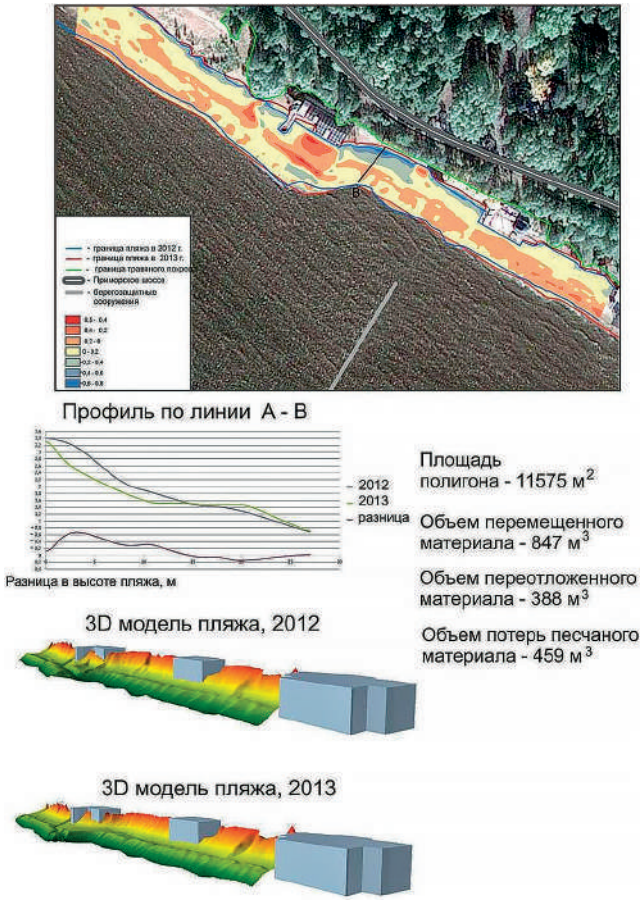


Рис. 4. Результаты лазерного сканирования в повторном режиме (песчаный пляж пос. Комарово)

Часть песка при этом откладывается на поверхности пляжевой ступени, в то же время в целом баланс осадочного материала оказывается отрицательным — часть песка безвозвратно теряется в результате выноса в нижнюю часть подводного берегового склона. В рассматриваемом случае объем потерь составил 459 м³ (около 90 м³ со 100 м протяженности пляжа).

Осень 2014 г. — зима 2015 г. были относительно спокойными. Несмотря на аномально теплые температуры опасных с точки зрения размыва берегов подъемов уровня, совпадающих с пиками штормовой активности, зафиксировано не было. Наиболее высокий уровень (148 см выше ординара) был зафиксирован 13 декабря в тылу активного циклона, сместившегося через Балтийское море в Финский залив.

Напротив, осень 2015 г. характеризовалась значительной циклонической активностью. Наиболее опасного уровня, с точки зрения размыва берегов, штормовое

воздействие достигло 5–7 декабря 2015 г., когда уровень воды в Финском заливе превысил отметку 227 см. Высота волн в открытой части залива в пиковые периоды шторма по данным модели (meteo.pl) составляла 3–4 м. Порывы юго-западного ветра достигали 23 м/с. Лед на акватории отсутствовал.

Берега Курортного района испытали очередной значительный размыв. По результатам лазерного сканирования [17] на пляже пос. Комарово размыв тыловой части пляжа составил 232 м³, безвозвратные потери песка — 4,5 м³ на 100-метровой береговой линии; в пос. Репино — 190 и 93 м³; в пос. Серово — 126 и 72 м³ соответственно.

Анализируя современные тенденции развития береговых процессов восточной части Финского залива, важно отметить, что по сравнению со второй половиной XX в., когда частота экстремальных штормов составляла один раз в 25 лет [2], в последнее десятилетие такие ситуации фиксируются значительно чаще (по данным наблюдений ВСЕГЕИ — четыре раза за 10 лет). Основными причинами являются климатические изменения: более теплые зимы приводят к более позднему установлению ледяного покрова, который играет защитную роль в абразионных процессах [9]. Кроме того, исследователями отмечается рост частоты экстремальных подъемов уровня Финского залива в зимний период [8].

Результаты мониторинга, выявившие резкую активизацию абразионных процессов в береговой зоне восточной части Финского залива, поставили задачу прогнозирования дальнейшего развития береговых процессов при различных сценариях климатических изменений. Попытка решения этой задачи была предпринята в ходе российско-финляндского проекта CliPLivE.

Прогнозирование развития береговой зоны восточной части Финского залива

Для создания трехмерной топографической ГИС-основы для прогнозирования использовались данные о рельефе Санкт-Петербурга масштаба 1 : 10 000, космические снимки высокого разрешения и топографические элементы генерального плана города. На первом этапе исследований с использованием указанных материалов и данных натурных наблюдений были построены карты распространения зоны волнового воздействия, соответствующая субаэральной границе береговой зоны. Для Курортного района эта величина колеблется в пределах 2–3 м.

При прогнозировании развития береговой зоны Курортного района Санкт-Петербурга на период до 2100 г. были рассмотрены различные случаи: 1) отсутствие климатических изменений (прогноз для текущей климатической ситуации); 2) «оптимистический» и 3) «пессимистический» сценарии климатических изменений.

Прогноз развития береговой зоны Курортного района для текущей климатической ситуации. При первом подходе за основу выполнения расчетов возможных скоростей отступания береговой линии принимались средние многолетние скорости размыва для различных участков берега, рассчитанные по данным ретроспективного анализа материалов дистанционного зондирования (МДЗ) и нивелировочного профилирования по опорным профилям, геологическое строение береговой зоны и экспозиция береговой линии.

Величина трансформации берегов была определена на основе анализа данных аэрофотосъемки и космосъемки с 1981 по 2011 г. Аэрофотоснимки были предоставлены НИИКАМ, космоснимки были получены из интернет-ресурса, предоставляемого bing maps. В ArcMap осуществлялась географическая привязка имеющихся снимков за разный период съемки к наиболее современному и наиболее детальному космоснимку (главному), имеющему встроенную геопривязку. Наложение отдельных фрагментов снимков для каждого участка позволило максимально исключить геометрические невязки, возникающие при наложении больших по площади космо- и аэрофотоснимков. Данные привязывались в системе координат WGS 84 UTM zone 35N. Наложение и привязка аэрофотоснимков и космоснимков к главному космоснимку осуществлялась по легко определимым объектам, не изменяемым со временем, таких как углы сооружений, столбы линии электропередач и т.п. После этот производилась оцифровка положения берегового уступа или авандюны на каждом из снимков.

Для анализа временной изменчивости были выбраны наиболее типичные участки берега Санкт-Петербурга, выделяющиеся по своим морфометрическим и геологическим особенностям: экспозиция берега, расчлененность, литологический состав отложений, слагающих берег, неотектоническая направленность развития и т.п. По результатам анализа МДЗ выделялись участки с однонаправленным изменением тыловой части пляжа или со стабильным состоянием. На таких участках, свободных от техногенного вмешательства, ставились балансовые точки. В них измерялись величины трансформации береговой зоны: ширина пляжа относительно среднегодового уреза, положение уступа или авандюны. Также фиксировалось наличие валунно-галечной отмостки на мелководье, и гранулометрический состав пляжа. Всего было выделено 42 балансовые точки вдоль всего побережья Финского залива в пределах Санкт-Петербурга, для которых производился расчет относительной трансформации берега в каждой балансовой точке.

Полученные измеренных скоростей отступания берега были наложены на данные о типе отложений в приурезовой части пляжа и карту уровня залегания поверхности морены. Мощность песчаных отложений и глубина поверхности подстилающей их морены, при достижении которой скорость размыва берега резко уменьшается, играет при прогнозировании дальнейшего развития береговой зоны принципиальную роль (рис. 5).

Интерполяция значений трансформации береговой линии между балансовыми точками проводилась по методу кригинга с поиском ближайших 12 точек по сферической модели. Интерполяция проводилась между точками на участках берега с одинаковой экспозицией. Получившиеся гриды служили основой для разделения береговой линии на отрезки с шагом изменения положения береговой линии на 0,5 м в год. Каждому отрезку задавалась буферная зона, соответствующая прогнозу изменения береговой линии на 50 и 100 лет. После чего осуществлялась экспертная оценка трансформации береговой линии с учетом геологического строения и геоморфологических особенностей береговой зоны.

Следует отметить, что такой параметр, как «ширина пляжа», является довольно эфемерным критерием, так как обладает значительной сезонной изменчивостью,

сильно зависит от направленности и интенсивности штормов, продолжительности их фаз и способности береговой зоны к самопроизвольному восстановлению за счет перераспределения материала. Более правильным подходом к прогнозированию развития берега является отслеживание положения тыловой части пляжа. Однако в этом случае следует иметь в виду, что стабильность берегового уступа или авандюны обусловлена защитной функцией пляжа, рассеивающей разрушающую энергию волн. Таким образом, исключать скорость сокращения пляжа из прогноза было бы некорректно. Для учета прогноза скорости трансформации береговой линии была принята концепция, отраженная на графике (рис. 6).

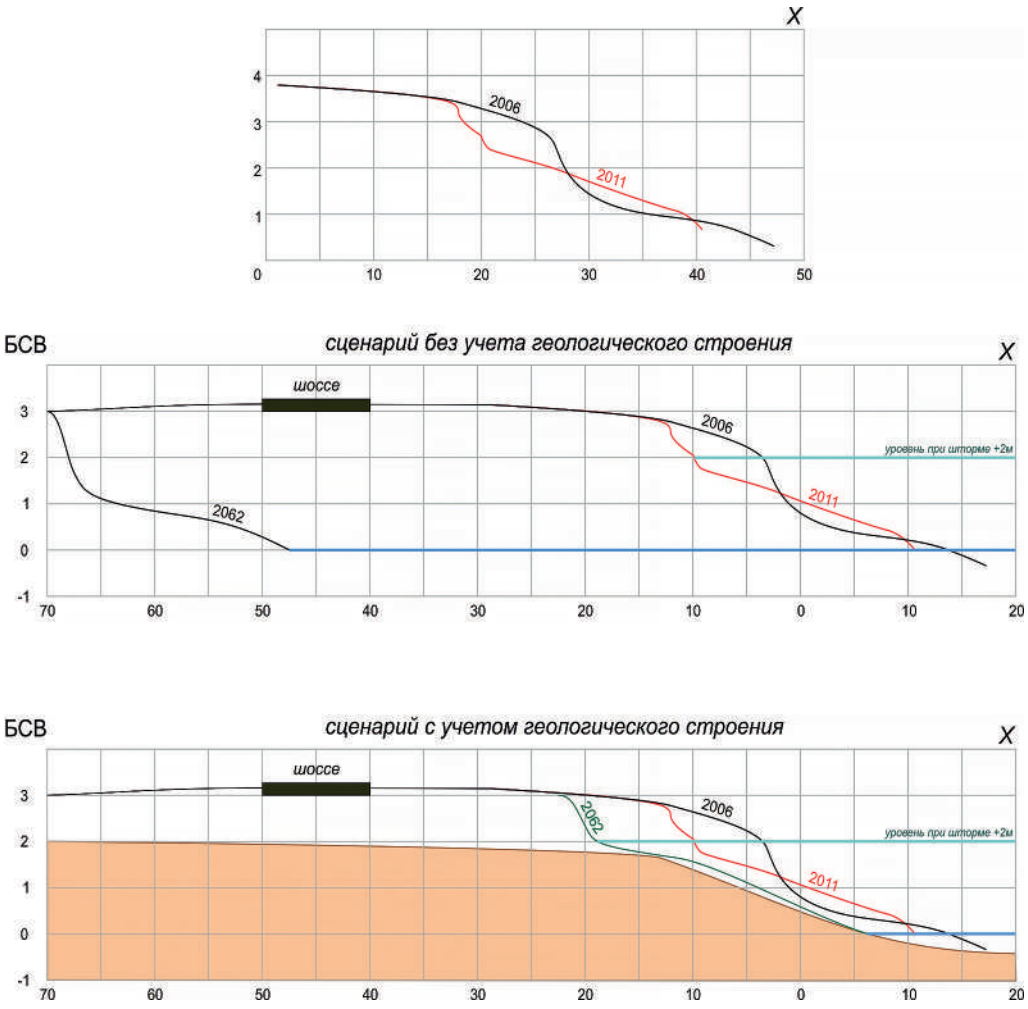


Рис. 5. Механизм развития абразионного песчаного берега
без учета и с учетом глубины залегания поверхности морены

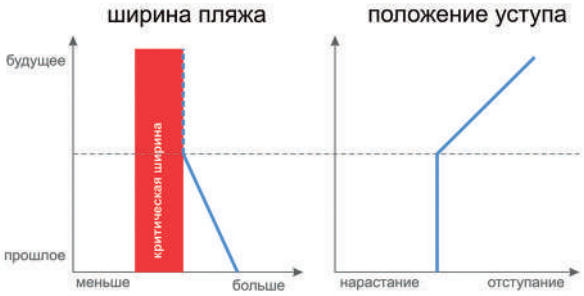


Рис. 6. Концептуальный график прогноза изменения береговой линии во времени, где слева показано среднее сокращение ширины пляжа до критической ширины, после которой пляж теряет защитные свойства; ломаная линия (справа) показывает изменение положения уступа

На участках береговой зоны, где в условиях штормовых нагонов воды пляж превращается в мелководную часть подводного берегового склона, береговой уступ легко подвергается разрушению. Важную роль в этом процессе играет экспозиция берега. Для северного побережья, по данным анализа МДЗ, наиболее уязвимым оказывается участок берега от пос. Комарово до пос. Солнечное: здесь наблюдается перманентное отступание берегового уступа, протекающее синхронно с сокращением пляжа. Таким образом, в существующих лито- и гидродинамических условиях пляж здесь достиг критической ширины. Наибольшей стабильностью обладает отрезок от пос. Солнечное до м. Дубовской.

Предложенная концепция (см. рис. 6) трансформации берега со временем может быть применима только к берегам, сложенным преимущественно песчаным материалом. Для моренных берегов, где под слоем пляжевых отложений расположены трудно размываемые валунно-галечные суглинки, график должен иметь иной вид, с достижением критической ширины пляжа (рис. 7).

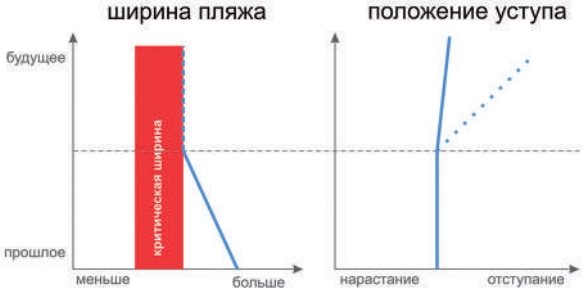


Рис. 7. Концептуальный график прогноза изменения береговой линии для моренных берегов

При более детальном рассмотрении механизма долгосрочного развития береговой зоны графики сокращения ширины пляжа и перемещения уступа приобретают ступенчатый вид (рис. 8). Резкие скачки на графике объясняются активизацией штормовых

процессов, приводящих к мгновенному отступанию берегового уступа и увеличению пляжа за счет мобилизации абразионного материала. В зависимости от продолжительности фаз шторма может происходить и уменьшение объема наносов, за счет выноса его на глубину за пределы зоны возврата.

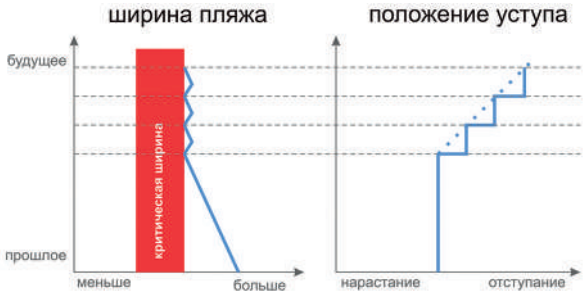


Рис. 8. Детализация графиков сокращения ширины пляжа и перемещения уступа

Таким образом, подход к выбору прогнозных скоростей отступания берега состоял из двух этапов: 1 — рассмотрение скорости сокращения пляжа как естественного барьера, защищающего побережье; 2 — рассмотрение скорости размыва тыловой зоны пляжа. Именно со вторым этапом связан значительный неблагоприятный эффект, оказывающий негативное влияние на прибрежные территории.

По результатам расчетов прогнозные карты развития береговой зоны Курортного района были построены в ArcGIS, визуализация результатов выполнена с использованием сервиса Google Earth. Расчеты показали, что при сохранении текущей климатической ситуации с учетом среднемноголетних скоростей отступания береговой линии и геологического строения общая площади потерянных в результате абразии прибрежных территорий Курортного района составит около 1,3 км², максимальные величины отступания абразионных уступов на отдельных участках берега могут достичь 50 м.

Прогноз развития береговой зоны Курортного района для различных сценариев климатических изменений. Научно обоснованный прогноз развития береговых зон восточной части Финского залива в соответствии с существующими сценариями климатических изменений представляется сложной задачей. Как было показано выше, основными гидрометеорологическими факторами, контролирующими интенсивность абразии, являются штормовая активность, уровень моря и длительность существования ледяного покрова. Из указанных параметров в настоящее время поддаются прогнозу в соответствии и общепринятыми сценариями климатических изменений средние скорости подъема уровня моря и длительность ледового периода.

Расчетные оценки показывают, что при реализации «благоприятного» сценария эмиссий парниковых газов «B2» повышение уровня моря в районе Санкт-Петербурга на конец XXI в. составит около 40 см. В том случае, если реализуется «неблагоприятный» сценарий «A2», высота подъема уровня восточной части Финского залива может составить до 1 м [14].

В связи с прогнозируемым повышением температуры приземного воздуха, прежде всего в зимние месяцы, к 2100 г. продолжительность ледового сезона в Финском заливе может уменьшиться на 1,5–2 мес. по сравнению с наблюдающимися в настоящее время, толщина льда уменьшится до 20–30 см, и только самая восточная часть залива будет полностью замерзать [15].

В то же время для наиболее важных с точки зрения интенсивности абразионных процессов факторов — штормовой активности и частоты возникновения наводнений — для Балтийского моря и Финского залива достоверных прогнозов в настоящее время не существует [19].

Согласно моделированию по геострофическим ветрам, штормовая активность была максимальной в период с 1881 по 1910 г., затем уменьшалась до 1965 г. [11]. С 1960-х по 1990-е гг. наблюдалась более интенсивная западная циркуляций в зимнее время, которая совпала с трендом изменения NAO-индекса, который в предыдущие двести лет изменялся незакономерно. Это привело к увеличению частоты проникновения океанских воздушных масс, повышению зимних температур и увеличению влажности в районах, подверженных воздействию западных ветров, особенно в 1990-х гг. В первой половине 2000-х гг. в Балтике отмечалось снижение штормовой активности, со второй половины 2000-х вновь фиксируется ее рост [18]. Однако в целом, по мнению специалистов, столетние временные серии наблюдений в Скандинавии не позволяют выявить четких трендов изменения штормовой активности. Различные источники данных показывают несколько разные результаты изменения ветрового режима, особенно это касается экстремальных ветров. Важно отметить, однако, что, по мнению большинства специалистов, наблюдается усиление воздействия экстремальных ветров.

В связи с отсутствием достоверных прогнозов частоты экстремальных штормов и нагонов в основу прогнозирования развития береговой зоны на ближайшее столетие было положено математического моделирования скоростей отступания берега для двух условных сценариев. «Оптимистический» сценарий предполагает подъем уровня Финского залива на 40 см при частоте экстремальных штормов, соответствующей средним показателям для второй половины XX в. — 1 раз в 25 лет. «Пессимистический» сценарий основан на расчетном повышении уровня моря на 1 м при частоте экстремальных штормов 1 раз в 10 лет.

Модель будущего развития рассматриваемых берегов можно представить как результат воздействия последовательных штормовых циклов, характеризующихся достаточно редкой повторяемостью. Речь идет об исключительно сильных штормах при высоте нагона не менее 2 м [6]. Как показали данные мониторинга, подтверждающие результаты математического моделирования [4], при экстремальных штормах наносы поставляются с авандюны на пляж, а в периоды более слабой волновой активности песок выносится с пляжа на подводный склон. В силу свойств действующих волнений потери материала из тела дюны оказываются необратимыми. Авандюна, таким образом, отступает. Рецессия имеет характер импульсов, которые совпадают с моментами экстремальных штормовых событий, воздействующих на верхнюю часть авандюны. В промежутках между этими событиями изменения затрагивают в основном приурезовую область пляжа, где доминирует размыв.

Результаты выполненных расчетов иллюстрирует рис. 9, где показаны положения берегового профиля после ряда последовательных экстремальных штормов (в количестве 10). В качестве начального (нулевого) принимается профиль 2011 г., зафиксированный до штормового периода.

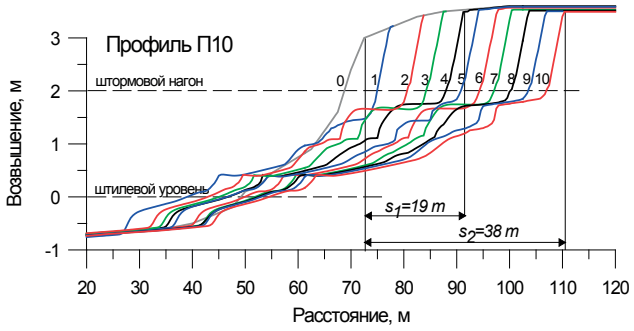


Рис. 9. Прогнозируемая рецессия берега в ближайшие 100 лет [5]

Согласно расчетам, береговой профиль постепенно отступает и становится более пологим, что характерно для берегов, развивающихся в условиях дефицита бюджета наносов, когда доминирует вынос материала [4]. Величина рецессии зависит от периода повторяемости экстремальных событий. Если считать, что он остается тем же, что и прежде (25 лет), то смещение бровки уступа в ближайшие 100 лет составит 19 м. Если же предположить уменьшение периода повторяемости до 10 лет, то рецессия через 100 лет достигнет вдвое большего значения — 38 м. Таким образом, скорость отступания берега будет находиться в интервале от 0,2 до 0,4 м/год. Соответствующие потери наносов, характеризующие дефицит бюджета, составят от 0,5 до 1 $м^3 м^{-1} год^{-1}$ [6].

Полученные величины согласуются с прежней оценкой рецессии 0,25 м/год, основанной на иных предпосылках и включающей эффект Брууна вследствие повышения уровня моря [5, 13]. Этот эффект дает прибавку скорости рецессии около 0,05 м/год. Однако с учетом тенденций климатических изменений, наблюдаемых в последние десятилетия, более вероятной представляется максимальная оценка рецессии 0,4 м/год [6].

Согласно методике моделирования, примененный подход к прогнозу предполагает наличие достаточного запаса песка на берегу и отсутствие выходов коренных пород (морены) на поверхность берегового склона. Поэтому полученные с помощью математического моделирования скорости отступания береговой линии для расчетных профилей, характеризующих различные сегменты берега, были скорректированы с учетом данных о глубине залегания поверхности морены, после чего, как и для случая текущей климатической ситуации, в AcrGIS были построены прогнозные карты развития береговой зоны Курортного района с визуализацией в Google Earth.

Расчеты показали, что в случае реализации «оптимистического» сценария при отсутствии эффективных адаптационных мер и учета результатов мониторинга в пространственном планировании прибрежных территорий максимальные величины размыва берега в Курортном районе достигнут 60 м, общая площадь потерянных

территорий составит 2,8 км²; при «пессимистическом» сценарии береговая линия на отдельных участках отступит на расстояние до 200 м, площадь потерянных земель достигнет 4,6 км². Примеры визуализации различных сценариев для участков берега Курортного района показаны на рис. 10, 11.

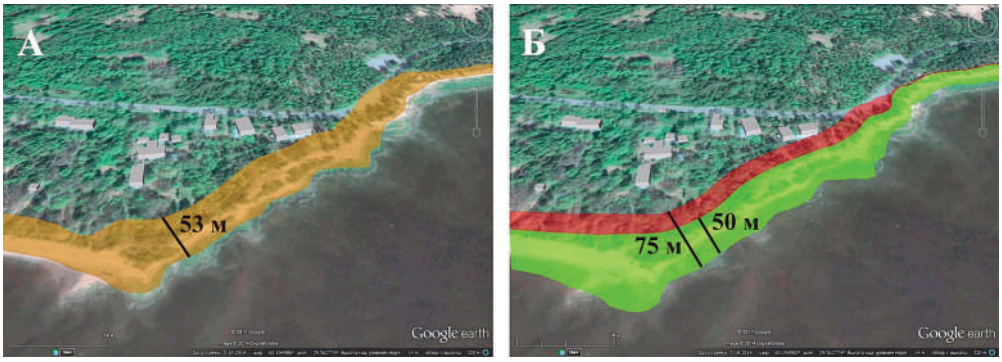


Рис. 10. Прогноз развития береговой зоны пос. Серово:
А — отступание берега при текущей климатической ситуации к 2100 г.;
Б — отступание береговой линии в соответствии с «оптимистическим» (светлая заливка) и «пессимистическим» (темная заливка) сценариями соответственно

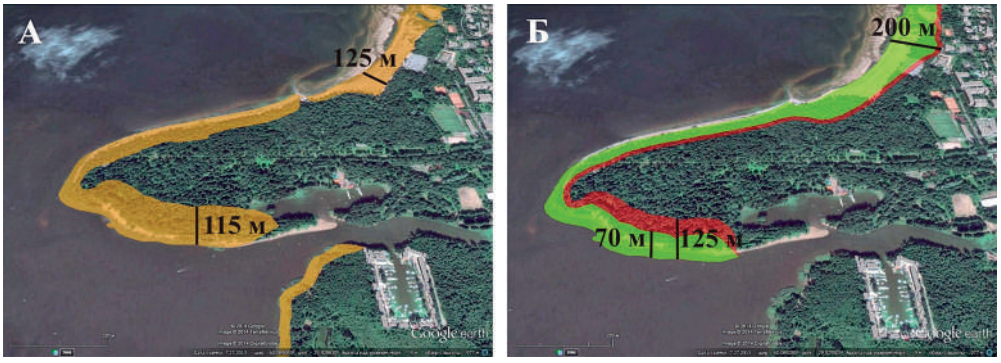


Рис. 11. Прогноз развития береговой зоны пос. Серово:
А — отступание берега при текущей климатической ситуации к 2100 г.;
Б — отступание береговой линии в соответствии с «оптимистическим» (светлая заливка) и «пессимистическим» (темная заливка) сценариями соответственно

Заключение

Таким образом, выполненные исследования показали, что геолого-геоморфологические причины создают долговременные предпосылки, а гидрометеорологические факторы определяют механизм развития абразионных процессов в береговой зоне

восточной части Финского залива. Результаты ежегодного мониторинга свидетельствуют об усилении негативных последствий абразии на протяжении последнего десятилетия. Анализ изменчивости основных гидрометеорологических факторов и результаты математического моделирования позволяют с высокой степенью вероятности прогнозировать дальнейшее развитие абразии, которое может привести к потере ценных приморских территорий. К концу XIX в., по различным сценариям, береговая линия на отдельных участках отступит на расстояние от 50 до 200 м, площадь потерянных земель достигнет от 1,3 до 4,6 км³.

Полученные результаты делают актуальным осуществление программы берегозащиты на основе междисциплинарного научного подхода, основанного на методах комплексного управления прибрежной зоной.

Литература

1. *Атлас* геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. — 78 с.
2. *Барков Л.К.* Литодинамические процессы в прибрежной зоне восточной части Финского залива от м. Лаутаранта до м. Дубовский // Изв. ВГО. 1991. Т. 123. Вып. 1. — С. 60–67.
3. *Гордеева С.М., Малинин В.Н.* Изменчивость морского уровня Финского залива. — СПб.: РГГМУ, 2014. — 179 с.
4. *Леонтьев И.О.* Моделирование эволюции берегового профиля на временных масштабах от десятков до тысяч лет // Океанология. 2012. Т. 52. № 4. — С. 588–599.
5. *Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Куренной Д.Н.* Береговой профиль восточной части Финского залива: результаты наблюдений и реконструкция развития в позднем голоцене // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. — С. 1034–1044.
6. *Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Ковалева О.А.* Прогноз рецессии берегов восточной части Финского залива на ближайшее столетие // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. — С. 480–487.
7. *Леонтьев О.К., Никифоров Л.Г., Сафьянов Г.А.* Геоморфология морских берегов. — М.: Изд-во МГУ, 1975. — 336 с.
8. *Павловский А.А., Менжулин Г.В.* О динамике Санкт-Петербургских наводнений в различные климатические периоды и оценке изменений уровня Финского залива при ожидаемом глобальном потеплении // Вест. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 7 (геология, география). 2010. Вып. 2. — С. 71–83.
9. *Рябчук Д.В., Колесов А.М., Сергеев А.Ю. и др.* Абразионные процессы в береговой зоне восточной части Финского залива и их связь с многолетними трендами режимообразующих факторов // Геоморфология. 2012. № 4. — С. 99–105.
10. *Ядута В.А.* Новейшая тектоника Санкт-Петербурга и Лен. обл. // Минерал. 2006. № 1. http://www.mineral-journal.ru/Article/yaduta.htm
11. *Alexandersson H., Schmith T., Iden K., Tuomenvirta H.* Long-term variations of the storm climate over NW Europe // The Global Atmosphere and Ocean System, 1998, vol. 6, p. 97–120.
12. *Harff J., Björck S., Hoth P.* The Baltic Sea Basin. — Springer, 2011. — 449 pp.
13. *Leont'yev I., Ryabchuk D., Zhamoida V. et al.* Reconstruction of Late Holocene development of the submarine terrace in the eastern Gulf of Finland // Baltica, 2010, vol. 23, iss. 2, p. 105–112.
14. *Meier H.E.M., Broman D., Kjellstrom E.* Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea // Climate Research, 2004, vol. 27(1), p. 59–75. — DOI:10.3354/cr027059.
15. *Neumann T.* Climate-change effects on the Baltic Sea ecosystem: A model study // Journal of Marine Systems, 2010, vol. 81(3), p. 213–224. — DOI:10.1016/j.jmarsys. 2009.12.001.
16. *Ryabchuk D., Kolesov A., Chubarenko B. et. al.* Coastal erosion processes in the eastern Gulf of Finland and their links with geological and hydrometeorological factors // Boreal Environment Research, 2011, vol. 16 (suppl. A), p. 117–137.
17. *Sergeev A., Zhamoida V., Leont'ev I.* Application of onshore scanning data for mathematical modeling of coastal profile changes // EMECS'11 — SeaCoasts'26 Conference Proceedings, 2016.

18. *Soomere T., Myrberg K., Leppäranta M., Nekrasov A*. The progress in knowledge of physical oceanography of the Gulf of Finland: A review for 1997–2007 // Oceanologia, 2008, vol. 50(3), p. 287–362.
19. *The BACC Author Team*. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin // Series: Regional Climate studies. Eds.: H.-J. Bolle, M. Menenti, I. Rasool. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. — 473 p. — DOI:10.1007/978-3-540-72786-6.

Работа выполнена в рамках проектов «Государственный мониторинг состояния геологической среды (состояния недр) прибрежно-шельфовой зоны Балтийского, Белого и Баренцева морей» (по заказу Федерального агентства по недропользованию), российско-финляндского проекта «CliPLive» («Адаптация городской окружающей среды к негативным последствиям климатических изменений») Программы «Юго-Восточная Финляндия — Россия» и проекта «Комплексные геолого-геофизические исследования в береговой зоне Курортного района Санкт-Петербурга» в рамках создания Генеральной схемы берегозащиты (по заказу Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга).

Канджанасири Вираекха, Сувансак Темсак, Лертрактавикул Чайпат, Салаеной Ганасит

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАДИЦИОННОГО ЗНАНИЯ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕСТНЫХ ТРАВ В ПРОВИНЦИИ ПИТСАНУЛОК, ТАИЛАНД

Kanjanasiri Wiraekha, Suwansak Temsak, Lertraktaweekul Chaipat, Salaenoy Ganasit

LOCAL WISDOM ABOUT VILLAGERS' FOLK MEDICINAL HERBS ON CURE DISEASE IN PHITSANULOK PROVINCE, THAILAND

Народные способы использования лекарственных трав были изучены в провинции Питсанулок (Таиланд). Проанализирован опыт использования лекарственных трав населением сельской местности. Изучен способ передачи знаний и опыта использования лекарственных трав. Показано, что использование лекарственных трав как традиционного народного средства может быть применено при лечении болей и вздутий в животе, язвы желудка, зубной боли, кашля, аллергии, головокружений, кожных заболеваний, гнойных воспалений, сыпи, конъюнктивита, расстройств печени, диабета, отеков и внутренних кровоизлияний. Передача знаний о народных средствах лечения осуществляется обычно путем демонстрации способа лечения, иногда — на своем примере.

Ключевые слова: народное знание, траволечение, народное лекарственное средство, деревенский мудрец, местный доктор.

Villagers' folk medicinal herbs in Phitsanulok Province in Thailand were studied. The folk wisdom about medicinal herbs was collected and analyzed. The processes of the knowledge management, and transfer of folk wisdom about medicinal herbs were investigated. The results show that the treatment with medicinal herbs is possible in cases of stomach ache, abdominal distension, gastric ulcer, tooth ache, cough, sore throat, allergy, dizziness, skin diseases, fester, rash on arm and neck, conjunctivitis, fatty liver disease, diabetes, ache at leg and bruises. The knowledge transfer of the folk wisdom about some medicinal herbs was realized mainly by treatment demonstration and self-recognition.

Keywords: folk wisdom, herbal medical treatment, folk medicinal herb, villager philosopher, local doctor.

Introduction

B. Sikarapum (1984) has reported, that the «villager doctors» take herbs to treat people and preserve them. Herbal medicine is regarded as «Thai folk wisdom», or «Thai local wisdom». A person who collected this knowledge for long time, and is omniscient or has knowledge in the folk wisdom about disease preservation to villagers, ancient medicine, herbal medicine is often called a «local doctor», or «villager philosopher», and has the special qualification. «Villager philosophers» must have the high level of moral, intellect, self knowledge management, and can transfer the knowledge to someone by any method. Some «local doctors» transferred these knowledge only to their relatives and members of the family. Some «local doctors» did

not transfer this knowledge to anyone. At the present time, this knowledge is nearly lost. The «local doctor» is now not important person, especially in Phitsanulok province. It is important to study local wisdom in this province, in order to remind the people how to realize the worth of Thai intellect by using medicinal herbs, and how to develop this tradition in the future.

Research Objectives

To study the local wisdom about villagers' folk medicinal herbs, the following goals and objectives were formulated.

1. To study the local wisdom knowledge in disease preservation by using herbs in Phitsanulok Province in Thailand.
2. To study the processes of receiving and collecting this local wisdom knowledge.
3. To study the management of this local knowledge wisdom.
4. To study the process of transferring of this local wisdom knowledge.
5. To study what kind of herbs are used in disease preservation.

Operation Definition Terminology

Local Wisdom Knowledge Management in Disease Preservation by Using Herbs means receiving, collecting, managing and passing of local wisdom knowledge in disease preservation by using herbs.

Local Wisdom Doctor means the person who has the knowledge about local wisdom knowledge management in disease preservation by using herbs.

Benefits

The principle benefits of the study could be as follows.

1. To understand the local wisdom in disease preservation by some villagers, who use some kinds of herbs, receiving and collecting traditional knowledge.
2. To realize the worth of Thai intellect about local wisdom knowledge management in disease preservation by using herbs, and develop this in the future.

Material and methods of research

1. Source of Data to research: Secondary Data from documents, and Original research data received from interviews (Fig. 1).

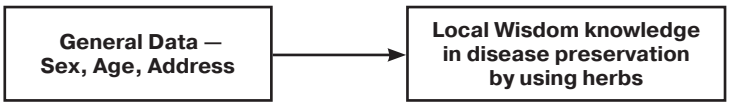


Fig. 1. Studied Variables

2. Research sample: the specific randomized sample were 16 villagers in Phitsanulok province (Thailand) who knew about disease preservation by using herbs (see List of Villagers).

List of Villagers who have been interviewed

1.	Mrs. Aiem Panthom	lives in Aranyik District
2.	Mr. Yob Bamrungdee	lives in Maung District
3.	Mr. Jakrapong Tampitak	lives in Maung District
4.	Mrs. Aree Srisam	lives in Maung District
5.	Mrs. Nonchan Janksin	lives in Bangrakam District
6.	Mrs. Ampan Sangkan	lives in Wangthong District
7.	Mrs. Pim Suwanachet	lives in Maung District
8.	Mr. Jamnong Boontam	lives in Prompiram District
9.	Mrs. Sutti Saito	lives in Bangkratum District
10.	Mrs. Saichol Pungrod	lives in Bangkratum District
11.	Mr. Tawin Mulnit	lives in Wangthong District
12.	Mr. Puanat Rakraung	lives in Maung District
13.	Mr. Somboon Cherboonmi	lives in Nakorn Thai
14.	Mr. Somkid Manjing	lives in Wangthong District
15.	Mrs. Saeing Naulpai	lives in Wangthong District
16.	Miss Serm Sritongdee	lives in Prompiram District

3. Research tool: structural interview form applied from Kanjanasiri et al. [1], and checked by 3 experts (IOC = 0.67 − 1) was used to collect data.
4. The way to collect and analyze data:
   4.1. To study and collect data from documents and related research papers.
   4.2. To study and collect data in field.
   4.3. To interview villagers in the districts of Phitsanulok province, who know local wisdom about disease preservation by using herbs.
   4.4. Data were analyzed by classification.
   4.5. Content data were analyzed by content analysis.

Results and Discussion

The 16 persons who have the local wisdom in disease preservation by using herbs in Phitsanulok province (Thailand) were interviewed. The results show that 8 persons are female (50 %). 6 person stay in Maung District (37.5 %), 5 person stay in Wangthong District (31.25 %), 2 persons stay in Prompiram District (12.5 %), 1 person stay in Bangragam District (6.25 %), 1 person stay in Bangkratum District (6.25 %), and 1 person — in Nakorn Thai District (6.25 %). 7 persons are more than 60 year old (43.75 %), 5 persons are 51–60 years old (31.25 %), and 1 person is between 30–40 years old (6.25 %).

Result 1. The local wisdom knowledge in disease preservation by herbs is used by some villagers in Phitsanulok Province for treatment a stomachache, affected by indigestion, a choked feeling in the stomach, coat the wound in the stomach, a toothache, repair cough, a sore throat, allergy, giddy the head, a stomachache during menstruation, skin diseases such as sore wound and infection, the rash on arm and neck, conjunctivitis, much fat in blood vessel and liver, diabetes, pains and aches, and bruise. Temsirirerkul et al. [4] explained, that if someone used herbs in disease preservation, he or she must be beware of it, especially using herbs in vomiting, the disease in the alimentary tract, skin disease and skin burn. That is corresponding with the research of Rungvichanivat and Mudsu [2] who have studied the Thai

folk medical wisdom in Kokpo District, Pattani Province, and did found, that the diseases cured by the local doctor were about the alimentary tract and skin.

Result 2. The local wisdom knowledge can be received and collected by different ways. The first way is connected with «villager philosopher» who has taught local people directly (75 %). The second way was the observation of the villager philosophers' treatments. The philosopher not taught local people directly, but they observed him and remember the information (18.75 %). The last way was self education by reading textbooks and receiving theoretical knowledge in herbs using. That is corresponding with the research of Rungvichanivat and Mudsu [2], which was a case study in Kokpo District, Pattani Province. These authors did found, that the way of local wisdom knowledge receiving and collecting was from «villager philosopher», who has taught people directly, further more from the observation in treatments and the data remembrance.

Result 3. The ways of management of local knowledge wisdom were investigated. All persons (local people) were able to remember the knowledge passed by doctors without recording and writing.

Result 4. The studying of transferring the local wisdom knowledge in disease preservation did show, that there was passing of knowledge mainly taught by demonstration, and student remembered it (68.75 %). The knowledge was taught them by experience, and the villager doctor was the supervisor (12.5 %). The villager doctor taught them by studying only herbal medicine groups, their names, and the way of treatment (6.25 %). Some local doctors did not teach anyone (6.25 %). It was shown that the majority was still passing on this knowledge by observation. That is corresponding with the research of Rungvichanivat and Mudsu [2], who did found, that the transferring of the local wisdom knowledge in the past was realized by «word of mouth, experience and memory».

Result 5. Herbs which are used in this local wisdom are:

1) Roselle (*Hibiscus sabdariffa*),
2) Oak leaf fern (*Drynaria qurcifora*),
3) Blindness tree (*Excoecaria cocchinchinensis*),
4) Thai basil (*Ocimum tenui florum*),
5) Clove (*Syzygium aromaticum*),
6) Tumaric (*Curcuma longa*),
7) Galanga (*Alpinia galangal*),
8) Safflower (*Carthamu stinctorius*),
9) Lemon grass (*Cymbopogon citrates*),
10) Malay jewel vine (*Derris scandens*),
11) Asiatic pennywort (*Centella asiatica*),
12) Spider tree (*Crataeva sp.*),
13) Tamarind guest herb (*Garcinia atroviridis*),
14) Indian Mulberry (*Morinda citrifoli.*),
15) East Indian screw tree (*Helicteres isora.*),
16) FalseTumeric root (*Curcuma xanthorhiza.*),
17) Aloe (*Aloe vera*),
18) Sea Holly (*Acanthus ebracteatus*).

B. Sikarapum [3] explained, that herbal medicine was used to treat the patients in the past.

Conclusion

1. The «local wisdom» knowledge helps in disease preservation by using herbs. «Local wisdom» knowledge in disease preservation by using herbs is used against a stomachache, affected by indigestion, a choked feeling in the stomach, coat the wound in the stomach, a toothache, repair cough, a sore throat, allergy, giddy the head, a stomachache during menstruation, skin diseases such as sore wound and infection, the rash on arm and neck, conjunctivitis, much fat in blood vessel and liver, diabetes, pains and aches, and bruise.

2. The local wisdom knowledge can be received and collected by different ways. The first way is receiving from «villager philosopher» who has taught them directly (75 %). The second way is from the observation of the «villager philosophers»' treatments who has not taught people directly. Nevertheless, people can collect this information about disease preservation by using herbs without recording and writing the information (100 %). That is corresponding with the research of Rungvichanivat and Mudsu [2], who did found, that the villagers remember this information (18.75 %). The last way is self education by reading textbooks and receiving experience in use herbs.

3. Studying the management of local knowledge wisdom did show that all samples were able to remember the knowledge about disease preservation by using herbs without recording and writing the information (100 %).

4. The studying of transferring the local wisdom knowledge in disease preservation did show, that there was passing of knowledge, mainly taught by demonstration, and student remembered it (68.75 %). Some local doctors did not teach anyone (6.25 %). It was shown that the majority of local people was still passing on this knowledge by observation.

5. Herbs which used in this local wisdom are: roselle (*Hibiscus sabdariffa*), oak leaf fern (*Drynaria qurcifora*), blindness tree (*Excoecaria cocchinchinensis*), thai basil (*Ocimum tenuiflorum*), clove (*Syzygium aromaticum*), tumaric (*Curcuma longa*), galanga (*Alpinia galangal*), safflower (*Carthamu stinctorius*), lemon grass (*Cymbopogon citrates*), malay jewel vine (*Derris scandens*), asiatic pennywort (*Centella asiatica*), spider tree (*Crataeva sp.*), tamarind guest herb (*Garcinia atroviridis*), indian mulberry (*Morinda citrifolia*), east indian screw tree (*Helicteres isora*), false tumaric root (*Curcuma xanthorhiza*), aloe (*Aloe vera*), sea holly (*Acanthus ebracteatus*).

References

1. *Kanjanasiri, Wiraekha, Naukamsak, Wandee Sunthornsamai, Amnauyporn, Samard Ard-anonk*. The research «Knowledge Management of Local Wisdom about Herbal Treatment Folk Medical in Donkaw Subdistrict, Maerim District, Chieng Mai Province». — Phitsanulok: Phitsanulok University, 2014. — 111 p.
2. *Rungvichanivat Siripan, Mudsu Abdolkarim*. Information of Thai Traditional Medicine Wisdom: a case study in Khokpho District, Pattani Province // Journal of Humanity and Social Faculty, Songkranakarin University, 2002, vol. 5(1), p. 133–157.
3. *Sikarapum Benjapan*. Herbs for Medicine. — PDbook, Bangkok, 1984. — 240 p.
4. *Temsirirerkul Rukravi, Sornlum Promjit, Choakul Wongsatit, Paonil Vichit, Pratanturarak Sompab*. Thai Herbs Medicine which we should know. 4th edit. — Bangkok: Saksopakanpim, 2004. — 176 p.

М.П. Федоров, М.Б. Шилин

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕРВОЙ СОВЕТСКОЙ ПРИЛИВНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА РУССКОМ СЕВЕРЕ (КИСЛАЯ ГУБА БАРЕНЦЕВА МОРЯ)

M.P. Fedorov, M.B. Shilin

ENVIRONMENTAL EXPERIENCES OF THE FIRST SOVIET TIDAL PLANT IN RUSSIAN NORTH (KISLAYA BAY OF THE BARENTS SEA)

Экспериментальная приливная электростанция, первая в Советской России и вторая в мире, функционировала в Кислой Губе Баренцева моря с 1968 по 1989 г. и была реконструирована в 2007 г. Воздействие приливной электростанции на экосистему ее бассейна, частично изолированную от моря, может быть оценено как локальное в пространстве, продолжительное во времени и переменное по интенсивности. Основными факторами воздействия приливной электростанции на прибрежную экосистему могут быть сокращение амплитуды приливов, снижение волнового воздействия, сокращение стока распресненной воды из отсеченного бассейна в открытое море, механическое травмирование лопастями турбины рыб и планктона. Экологически наименее опасный суточный режим работы гидроагрегата — непрерывная трехсменная 24-часовая эксплуатация. Методы мониторинга, отработанные в Кислой Губе, могут быть применены на крупных водных бассейнах Русского Севера и Дальнего Востока, где предполагается развитие приливной энергетики.

Ключевые слова: приливная электростанция, мониторинг, экологическая безопасность, прибрежная природно-техническая система, биологические сообщества, бентос.

Experimental tidal power plant, the first one in Soviet Russia and the second in the World, worked in Kislaya bay on the coast of Barents Sea from 1968 until 1989, and was reconstructed in 2007. The influence of tidal plant on coastal ecosystem of the basin, partially separated from the Sea, can be assessed as local in space, long-term in period, and changing in its intensity. Main factors of the plant influence on the coastal ecosystem can be: reduction of tides amplitude; reduction of waves; reduction of freshwater discharge from the dammed basin to the sea; mechanical influence of the turbine on plankton and fish. Environmentally least dangerous regime for hydro-aggregate is the continuous three-shift 24-hour operating. Methods of monitoring, which were tested in Kislaya bay, can be transferred to larger water basins in Russian North and Far East that are planned to be used for the development of tidal industry.

Keywords: tidal power plant, monitoring, environmental safety, coastal natural and technical system, biological communities, benthos.

In 2008 it was the 40th anniversary of operation of the Russian pioneer tidal power plant, Kislogoubskaya TPP (= TPP «Kislaya Gouba»), which is situated at West Mourman coast of the Barents Sea. This TPP, that is a monument for science and technology of Russia, is a one-basin plant of double-sided operation (Fig. 1). The TPP was built as an experimental

project to prove that tidal power plants are actually possible to construct in Russia [1]. The construction of TPP was realized during 1964–1967. It was planned to begin the exploiting of TPP in 1967, in the year of 50-years anniversary of the Great October Socialist Revolution, but in fact the TPP started to work one year later.

Fig. 1. The TPP «Kislaya Gouba» at West Mourman coast of the Barents Sea

By Kislogoubskaya TPP construction and operation, the viability of the tidal energy use and the ecological safety of tidal power plants were proved. At the present time, the influence from this TPP on the coastal zone is not significant due to its low capacity — 1,5 MW. Its output capacity, as RSHU professor A.V. Nekrasov used to say, who as a tide expert participated in validation of the TPP exploitation regimes, — is «four hundred electric irons». In fact, the TPP «Kislaya Gouba» served itself. However, in future a significant increase of the tidal power industry influence on coastal zone ecosystems is expected. Several large TPPs are developed for the North of Russia. In particular, Mezen TPP with capacity up to 11 000 MW, and Kuloy TPP — 320 MW are projected in the White Sea; the energy can be directed to the Western Europe by the integrated energy system «East-West» [1, 7, 10].

Evidently, only the complex environmental monitoring can be the source of the objective information for the assessment of environmental safety of TPPs. But the development of TPPs monitoring methods is late in comparison to the development of tidal power industry [6, 8].

The convenient object for the development and testing of monitoring system is the basin of Kislogoubskaya TPP. The assessment of the ecological situation in this basin is interesting for the forecast of possible changes in the basins of designed TPPs in the future [4, 9].

Methodology of research

The basin of Kislogoubskaya TPP is Kislaya gouba. In old Russian «pomor» sleng the word «gouba» was used for the small bay (in our case — 1,1 km2). Geomorphologically, Kislaya

gouba is a fjord 3.5 km long, that is through the narrow sound in its northern part connected to Barents Sea (Fig. 2). The sound is dammed with the TPP barrage. Mean depth of the bay is 12.5 m. The basin includes two smaller sub-basins (depressions) in its central and upper parts, about 36 m deep, divided by a step about 5 m deep. The number of small river fall into the top of the bay.

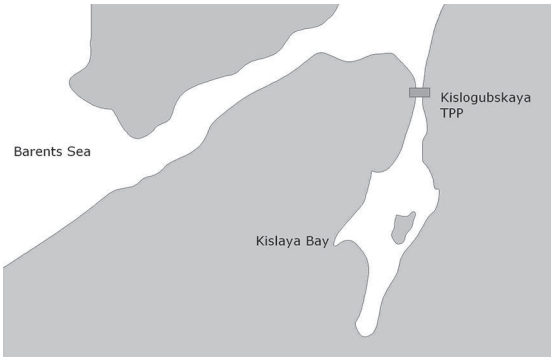


Fig. 2. Location of Kislaya bay («gouba») and Kislogoubskaya TPP [9]

The rocky coasts of the Kislaya bay are covered by tundra. In the central part of the bay, the small island Tyulen (what means «Seal») is located (Fig. 3).

Fig. 3. Coasts of the Kislaya bay, and the Tyulen Island

The unregular study of environmental conditions in the Kislaya bay area has begun since 1924 [2, 3], and was continued in 1964–1982 by Polar Fisheries and Oceanography Institute (PINRO) [5]. Detailed study of environmental impact from Kislogoubskaya TPP is

carried out since 1983, involving experts from PINRO, Moscow State University named after M.V. Lomonosov and Russian State Hydrometeorological university (RSHU) [4, 5, 7, 11, 12].

In the second half of 1990s (1996–1998) the programme of complex environmental monitoring of Kislogubskaya TPP area was successfully fulfilled in frames of the UNESCO project «Baltic Floating University (BFU) — the Northern component» [11, 12]. On the basis of results of this programme, the analysis of the process of forming and functioning of «coastal natural and technical system» (CNTS) in tidal power plant area was carried out. The complex assessment of the situation in the Kislaya bay ecosystem was carried out for stages of forming, exploitation and modernization of CNTS. According to the data on coastal biological communities' diversity the changes of their sustainability were defined. The speed of returning of the transformed ecosystem to the initial state after the elimination of stress influence was evaluated [6, 7, 8].

The following information on CNTS state was collected: information on technical object, on abiotic environment and on coastal biological communities. Benthos was chosen as a most informative and practically handy object for monitoring. Its high informativeness in relation to the state of the coastal water environment in comparison to other groups of organisms is determined by the fact that benthos is stable in time, characterizes the local situation in space and is capable to present the changes of ecosystem in retrospective. For the assessment of benthos state disturbance the 6-score scale was used (Fig. 4).

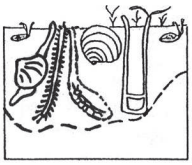
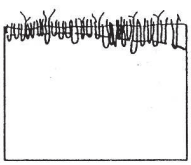
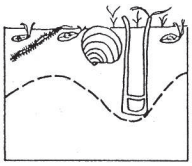
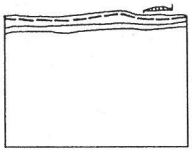
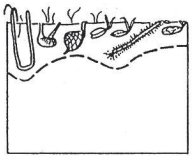
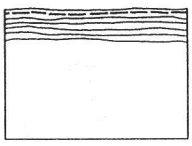
Soft silts communities	Biota alteration index BAI	Qualitative assessment of state	Score, points	Soft silts communities	Biota alteration index BAI	Qualitative assessment of state	Score, points
	> 1	Improved	**6**		0,55–0,75	Moderate	**3**
	0,9–1,0	Normal	**5**		0,3–0,55	Bad	**2**
	0,75–0,9	Good	**4**		< 0,3	Cata-strophic	**1**

Fig. 4. Scale of evaluation of the intensity of biota state disturbance

According to this scale the «normal» (reference) state of biota had the score «5». Communities of soft silts — with the high species diversity and domination of filtrator bivalves and digging polychaetes that dig deep down into the bottom and structure its surface layers

significantly — corresponded to this state in the Kislaya bay ecosystem. The disappearance of filtrator mollusks indicates the change of community state from «normal» to «good» (score «4»). «Moderate» state is attributed to the communities represented by chironomids and oligochaetes that are resistant to pollution (score «3»). When the state of the community is «bad» only the actively migrating hydrobionts that to not dig into the silt are found here (score «2»). Finally, when the community state is «catastrophic» the living organisms are absent in the sample (score «1»). The situation of improving of «normal» state of the community is possible when, for example, the mollusks with developed siphons, bottom digging crustaceans and others are introduced into the community — in this case the score «6» is possible.

Results of the «BFU — North» cruises showed that forming of CNTS with a TPP is a complex long-term process when natural factors acting in the TPP basin are significantly transformed by man.

Ecological succession of natural and technical system with tidal plant «Kislaya Gouba»

Before the regulating, Kislaya bay was the typical fjord for West Mourman coast, with the diverse marine biota. In winter it was only partially covered with ice. Before the TPP construction, a water exchange with the sea was unconstructed. The tide was regular, semi-diurnal.

During the 4 years of TPP construction (1964–1968) the bay was dammed from the sea with the solid barrage. The water exchange with the sea decreased down to few percents from the natural one (Fig. 5). Water of the streams flowing from the bald mountains made the surface layer of freshwater 5–7 m thick. In winter the entire surface of the bay was frozen. As a consequence, all littoral biota down to 5 m deep was destroyed. High density gradients on the border of fresh and marine waters prevented mixing and saturating of bottom waters with oxygen. In the deep areas (deeper than 15 m) benthos was poisoned with the accumulated hydrogen sulfide. The survived pieces of marine fauna remained in suppressed state on depths from 5 to 12 m. Traces of this ecological catastrophe are still found in the bay as deposits of dead shell.

After the plant start in 1969 and its work in design regime the marine conditions in TPP basin were partly restored, although the water exchange was 5 times lower than natural (Fig. 5). The tidal amplitude became significantly lower than before; the tidal cyclicity was broken. Partial restoration of biodiversity was possible due to the introduction of brackish-water species.

In 1974 the TPP authorities ignoring the objections of projecting organization moved to two-shift and then — to one-shift operation regime (for the reduction of maintenance staff). Due to the long-lasting stops with the water lines closed the water exchange with the sea was frequently interrupted for the periods from a few days to a few months. The second ecological catastrophe happened in the basin with the biota kill.

In 1983 the TPP moved to the almost projected three-shift 24-hour regime of hydro-aggregate operation. As a result the water exchange rose up to 25–30 % from natural (Fig. 5). The restoration of marine communities and the washing-out of hydrogen sulfide zones in the deeps began. From 1989 after the breakdown of hydro-aggregate the regime close to the recommended was sustained with the idle water passing through the bottom spillway (and through the surface spillway in spring). Through this in 1990s and 2000s the gradual recovery of normal marine communities appeared in the bay.

Observation period, years	Reference	Operation regime	Water exchange in relation to the natural	Biocenosis changes	Index	Score	Ecosystem state	Observations made
Before 1964	Гурьянова и др., 1928, 1929	Natural regime	100 %	Natural state	1,0	5	Normal	Individual observations
1964–1968	Семенов, 1991	Construction, commissioning	Up to 6 %	Destruction of bottom fauna	< 0,3	1	Catastrophic	Individual observations
1969–1973	Семенов, 1991	Projected	Up to 20 %	Introduction of brackish-water species	0,3–0,55	2	Bad	Individual observations
1974–1982	Семенов, 1991	One- and two-shift	2–3 %	Kill	< 0,3	1	Catastrophic	Individual observations
1983–1991	Марфенин и др., 1995	Projected three-shift	25–30 %	Beginning of recovery of marine communities	0,55–0,75	3	Moderate	Regular observations
1992–1999	Fedorov, Shilin, 1996; Марфенин и др., 1995	Idle passing of water; hydro-aggregate not in operation	30 %	Recovery of depleted marine communities	0,75–0,9	4	Good	Geoecological monitoring
1999–2004	Kluikov et al., 1999	Axial flow turbine removed; preparation of orthogonal turbine	Up to 50 %	Restoration of normal marine communities	> 0,9	5	Normal	Geoecological monitoring

Fig. 5. Forming of Kislaya Guba CNTS

Before the TPP construction and in the first 15 years of its operation the TPP monitoring was not conducted as the «environmental monitoring conception» itself was formed only in the mid-1970s [13]. Some individual observations in this period were carried out by various authors that compiled the lists of biota [2, 3]; this allows to define retrospectively the state of biological communities of Kislaya bay in comparison with the adjoining areas of the Barents Sea as «catastrophic» and «bad» (scores «1» and «2»).

Systematic survey in Kislaya Guba in monitoring style was started from 1983 with PINRO and Moscow State University [4, 5]. This was exactly the time of plant moving to the designed three-shift operation regime and recovering of biological communities to «moderate» state (score «3»).

In the second half of 1990s the «BFU-North» expedition evaluated the biota state as «good» (balanced) with the score «4». In the beginning of 2000s due to the removal of axial flow turbine and the increase of water exchange in the bay up to 50 % of the natural one the restoration of normal marine communities occurred.

Present ecological situation in the basin of TPP «Kislaya Gouba»

The purpose of the «BFU-North» expeditions was to develop a monitoring technique for marine coastal natural and technical systems and for estimation of the change of the condition of the Kislaya bay ecosystem.

Two basic types of benthos associations are recognized within the zone of tidal influence. A stony littoral association is formed basically by 10 species. It is a barnacle «sea acorn» *Semibalanus balanoides*; gastropods (snails) *Littorina littorea*, *Testudinalia tesselata*, *Margarites groenlandica*, *Buccinum undatum*; clams *Mytilus edulis*; amphipoda *Gammarus setosus*; urchins *Strongylocentrotus droebachiensis*; polychaete worms *Nereis virens* and pagurians *Pagurus pubescens*.

The association formed by three leading species: *Chironomus salinarius*, clams *Mya truncate* and amphipoda *G. setosus* is observed in small lagoons of the western coast of Kislaya bay on silty-sandy shallows.

The first association is a marine one by its structure, the second — a transitive from saltish-water to marine. Borders of littoral communities were stabilized, a number and a biomass of leading species are increasing.

The washing-out of hydrogen sulfide zones in the deeps was continued. The colonization of depressions by benthic organisms began. Rarefied settlements of clams *Modiolus modiolus* (in the middle part of the gulf) and colonies of sea anemones *Metridium senile* (in the top and the middle parts of the bay) are found in lower sublittoral (Fig. 6). A scallop sandbank was charted on the border between top and middle parts of the gulf by results of diving researches.

The forming ecosystem differs from the initial one, which corresponds with new conditions of the lowered water exchange.

Analysis of joint observations conducted in the ecosystem allows to define the optimal operating regimes for hydro-aggregate. Environmentally least dangerous is the close to projected three-shift 24-hour operating regime when the tendency to normalization of situation in the TPP basin occurs.

Main factors of TPP influence on the coastal ecosystem can be:

– reduction of tides amplitude;
– reduction of waves;
– reduction of freshwater discharge from the dammed basin to the sea;
– mechanical influence of the turbine on plankton and fish.

In abnormal «high water years», like 1996, the biological communities in TPP basin are exposed to the short-term shock impact as a result of the strong water desalination due to the great volume thawed and drain waters.

It was shown that the management of CNTS with the TPP is possible with accounting for and controlling of all defined affecting factors. It is evident that in future during the TPP construction in semi-enclosed marine bays that leads to the reduction of tides amplitude and the increase of the dry period, the decrease in biomass of bottom organisms and the slowing down of production processes in littoral zone are to be expected.

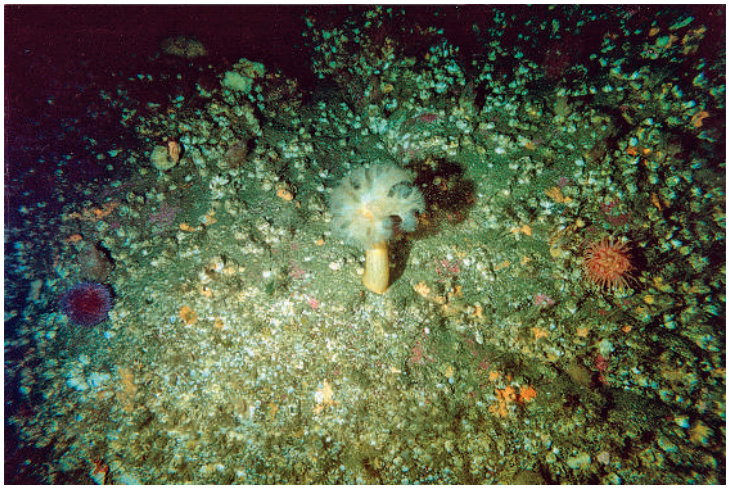


Fig. 6. Sea anemones *Metridium senile* in benthic communities in Kislaya bay

In general, the influence of Kislaya Gouba TPP on coastal ecosystem can be assessed as local in space, long-term in period and changing in its intensity. In present this influence is not significant and hazardous. Modern environmental situation in the basin of Kislaya Gouba TPP can be assessed as non-dangerous; the ecosystem state is normal (natural). At the same time it was shown that at the individual stages of CNTS formation the environmentally hazardous situations can occur that can lead to catastrophic consequences for coastal ecosystems.

The specific feature of the environmental situation in present time and in future is a real practical capability to control all influencing factors on CNTS. The main means of control is the sustaining the projected regime of hydro-aggregate operation which is based on three-shift 24-hour running.

Additional means of control is the possible engineering support of TPP basin ecosystem — non-traumatizing passing of plankton through the TPP hydro-aggregates; the supply of TPP

barrage with selective spillways for fresh surface water; creation in the littoral zone of artificial biotopes in the form of a synthetic seaweed which does not react on the desalination and attracts mobile forms of hydrobionts; supply of cold aerated water into hollows with deficiency of oxygen by the pipeline from the open Barents Sea.

It is interesting to see that for more than 36 years of TPP operation the systematic observations of Kislaya Gouba state were conducted during 16 years, but the regular monitoring — for only 8 years. In present time the first in the world experimental orthogonal turbine with 1.5 MW capacity is installed on the TPP, which was made in 2006 on «Sevmash» enterprise in City of Severodvinsk by order of JSC «GidroOGK» [10].

It is undoubted that the return of the Kislaya Gouba TPP to the operating regime requires the restoration of the monitoring system and the permanent observation of the factors of anthropogenic influence on the TPP basin ecosystem. Complex environmental monitoring must be the compulsory element of management of CNTS with the TPP as a source of information for the decision making for providing the ecological safety of the coastal zone. Tested methods of monitoring of CNTS with the TPP can be transferred to larger water basins that are planned to use for the development of tidal industry.

Conclusion

Carried out researches enable to consider an ecological situation in Kislaya bay as «quasi-stable». On the one hand, the biological communities at the present time are supported at the high level. On the another hand, the ecosystem formation and stabilization in Kislaya bay is not finished till now. The system which is forming differs from the initial one, corresponding to new abiotic eciological conditions. The biological communities in TPP basin can be especially vulnerable to the short-term shock impacts — like strong water desalination due to the great volume thawed and drain waters.

Impoverished biological diversity, smaller stability in comparison with control natural ecosystems on the open coasts of Barents Sea, and the dependence from the TPP regime can be considered as basic features of the «natural and technical system» of the TPP «Kislaya Gouba». Littoral (due to the possible intensive desalinating of sea waters) and depressions of sub-basins (due to the deficiency of oxygen) could be named zones of ecological risk.

Optimization of ecological situation in the TPP basin is possible by means of the system of engineering measures.

Realization of ecological monitoring in Kislaya bay enabled to collect material for substantiation of ecological safety of powerful TPP projects in Russia. Detailed researches of possible ecological consequences of TPP environmental impact conducted at natural conditions at experimental Kislogubskaya TPP have brought essential contribution to development of designing, construction and operation principles for tidal power plants.

References

1. *Бернштейн Л.Б., Силаков В.Н., Усачев И.Н.* Приливные электростанции: в 2 т. — М.: ин-т «Гидропроект», 1994.
2. *Гурьянова Е.Ф., Закс И.Г., Ушаков П.В.* Литораль Кольского залива. Ч. 1 // Тр. Ленингр. об-ва естествоиспыт. — Л.: Изд-во ГГИ, 1928. — Т. 58. Вып. 2. — С. 89–143.

3. *Гурьянова Е.Ф., Закс И.Г., Ушаков П.В.* Литораль Кольского залива. Ч. 2 // Тр. Ленингр. об-ва естествоиспыт. — Л.: Изд-во ГГИ, 1929. — Т. 59. Вып. 2. — С. 47–152.
4. *Марфенин Н.Н., Малютин О.И., Пантюлин А.Н. и др.* Воздействие приливных электростанций на окружающую среду. — М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1995. — 125 с.
5. *Семенов В.Н.* Виды антропогенного воздействия на морские экосистемы и некоторые способы их выявления. — Апатиты, 1991. — 240 с.
6. *Шилин М.Б., Федоров М.П., Клюйков Е.Ю. и др.* Оценка экологической ситуации в бассейне Кислогубской приливной электростанции // Гидротехническое строительство. 1998. Т. 12. — С. 25–30.
7. *Шилин М.Б.* Кислогубская приливная электростанция: возвращаясь снова и снова // Учен. зап. РГГМУ. 2009. № 11. — С. 101–112.
8. *Fedorov M.P., Shilin M.B.* Control of ecological situation in the basin of the tidal power station (Kislaya bay, Barents sea) // Ecohydraulics: Proc.of the 2nd Intern. Symposium on Habitat Hydraulics. Vol. A. — Quebec: INRS/IAHR, 1996, p. 145–154.
9. *Fedorov M.P., Usachev I.N., Suzdaleva A.L. et. al.* Ecological Aspects of Tidal Power Plants // The International Journal on Hydropower&Dams, Marine Energy Supplement, 2009, p. 32–35.
10. *Fedorov M.P., Shilin M.B.* Ecological Safety of Tidal Power Projects // Power Technology and Engineering, 2010, vol. 44, iss. 2, p. 117–121.
11. *Kluikov Ye.Yu., Lukyanov S.V., Shilin M.B. et. al.* The impact of the Kislogubskaya tidal Power Plant on the Ecology of Kislaya Bay with Reference to the Socio-economic Development of the Murman Coast of the Barents Sea // Baltic Floating University Research Bulletin / UNESCO, 1996, № 2, p. 42–53.
12. *Kluikov Ye.Yu., Lukyanov S.V., Shilin M.B. et. al.* The Kislaya Bay of the Barents Sea as a Laboratory for Studying Variability of Oceanographical Characteristics in Coastal Ecosystems // Baltic Floating University Research Bulletin / UNESCO, 1999, № 3, p. 81–84.
13. *Shilin M.B., Khaimina O.V.* Applied Marine Ecology. — St.Petersburg: RSHU, 2014. — 79 p.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Е.П. Истомин, А.А. Фокичева, А.А. Коршунов, Л.С. Слесарева

УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ РИСКАМИ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

E.P. Istomin, A.A. Fokicheva, A.A. Korshunov, L.S. Slesareva

THE MANAGEMENT OF HYDRO METEOROLOGICAL RISKS IN SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS

Влияние гидрометеорологических условий на социально-экономические системы представлено в виде случайного процесса и выделены различные категории рисков, вызываемых воздействием неблагоприятных условий погоды. Рассмотрены экономические и информационные аспекты управления гидрометеорологическими рисками.

Ключевые слова: социально-экономические системы, гидрометеорологические риски, случайный процесс, неблагоприятные гидрометеорологические условия.

Influence of meteorological conditions on the socio-economic system is represented as a random process. Different categories of risk caused by exposure to adverse weather conditions are highlighted. Economic and informational aspects of hydro-meteorological risk management are considered.

Keywords: socio-economic system, hydro-meteorological risks, stochastic process, adverse meteorological conditions.

В вопросах государственного и муниципального управления особая роль отводится проблемам устойчивого развития территорий, в том числе оценке экономической, социальной и экологической устойчивости регионов [1]. Принятие управленческих решений должно учитывать постоянную взаимосвязь экономической и социальной деятельности с природными, в том числе гидрометеорологическими, условиями. В то же время современная экономическая деятельность ведется в условиях неопределенности, поэтому ожидаемые доходы и расходы не могут быть рассчитаны однозначно. Поскольку отклонения плановых и фактических величин доходов и расходов имеет случайную природу, негативные последствия неопределенности результатов экономической деятельности принято характеризовать понятием риска. Риски экономической деятельности связаны, в том числе, с воздействием погоды и климата [4]. Гидрометеорологическая среда способна оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на социально-экономические системы: погодо-климатические условия выступают в роли природных ресурсов в сельскохозяйственном производстве, энергетике, лесном хозяйстве, водном хозяйстве и т.д. В то же время неблагоприятные

и опасные гидрометеорологические условия и явления погоды являются причиной возникновения экономических и социальных потерь, которые необходимо исследовать в пространственно-временном аспекте с учетом плотности распределения и видов производственной (экономической) деятельности на заданной территории.

По статистическим данным Федерального государственного учреждения «Всероссийского научно исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных» (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»), наибольшее число воздействий с точки зрения экономических и социальных потерь несут жилищно-коммунальное хозяйство, энергетика, сельское хозяйство и автотранспорт [9].

Нарастающая гидрометеорологическая опасность рассматривалась и особо выделялась во многих исследованиях зарубежных и российских исследователей, в работах, публикуемых Всемирной метеорологической организацией (ВМО) [5,12], неоднократно обсуждалась на международных и региональных конференциях. При этом во многих исследованиях отмечалось, что национальные метеорологические службы могли бы принести большую пользу сообществу, если бы в своей деятельности они проводили также сравнительный анализ сведений о негативных последствиях от воздействия экстремальных, неблагоприятных условий погоды и опасных гидрометеорологических явлениях и разрабатывали с их помощью уточненные методики для прогнозирования воздействия опасных явлений и погоды в целом на человека.

В работе [2] предложено выделять следующие группы рисков экономических систем, связанных с воздействием гидрометеорологической среды.

1. *Риски от ежедневных колебаний погодных условий* — погодозависимость экономической деятельности находит отражение в модели дополнительных издержек, связанных с отклонением ожидаемых погодных условий от наиболее благоприятных для реализации данного вида экономической деятельности.
2. *Катастрофические риски от экстремальных проявлений погоды и климата* — обусловливают проблему устойчивости экономической системы к воздействию гидрометеорологической среды.

Управление гидрометеорологическими рисками является условием обеспечения гидрометеорологической безопасности и должно осуществляться как на микро-, так и на макроэкономическом уровне. Прежде всего необходим анализ, направленный на выявление в экономической системе *субъектов риска* — погодозависимых элементов экономики — и определение для них видов потенциального ущерба, а также выявление *факторов риска* (определение пороговых значений метеорологических величин и условий погоды, реализация которых может привести к реализации риска для субъекта риска). Отметим, что любая социально-экономическая система обладает такими характеристиками, как *подверженность* и *уязвимость* к негативному влиянию гидрометеорологической среды [8]. Подверженность определяется особенностями воздействующего явления или условия погоды, зависит от масштабов экономических объектов, расположенных на заданной территории, и их плотности и является необходимым, но не достаточным детерминантом гидрометеорологического риска. Уязвимость рассматривается как восприимчивость подверженных гидрометеорологическому воздействию элементов социально-экономической системы неблагоприятным последствиям (экономическим и социальным потерям). Степень уязвимости

определяется возможностями данного элемента социально-экономической системы к защите от воздействия неблагоприятных гидрометеорологических условий или опасного явления погоды.

Исследуя зависимость результатов экономической деятельности от влияющего метеорологического фактора X, будем полагать, что ущерб U возможен, если реализованное значение X больше установленного порогового значения $X_{\text{пор}}$, определяемого спецификой экономической деятельности ($X > X_{\text{пор}} \rightarrow U > 0$), и ущерб является функцией значения метеорологического фактора $U = U(X)$. Реализация X в момент времени t является случайным событием, а изменение X во времени представляет собой случайный процесс $X(t)$ [3], как показано на рис. 1.

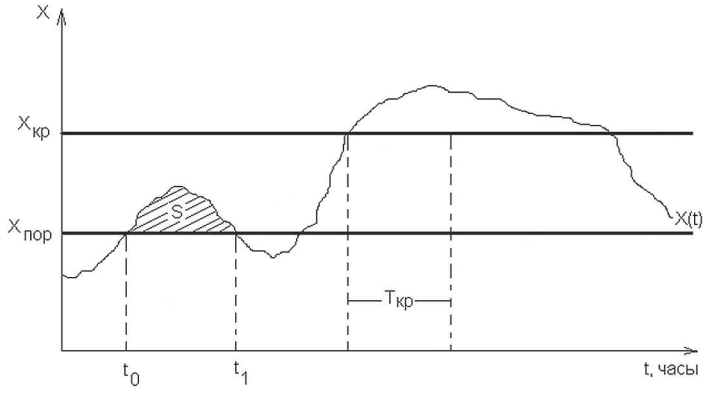


Рис. 1. Реализация метеорологического фактора во времени

Очевидно, что ущерб может рассматриваться как случайный процесс, который будет зависеть от длительности периода времени $t_1 - t_0$, в течение которого выполняется условие $X > X_{\text{пор}}$, и суммарной величины положительного отклонения $\Delta X = X - X_{\text{пор}}$ воздействующего метеорологического фактора, то есть площади S:

$$S = \int_{t_0}^{t_1} \left[X(t) - X_{\text{пор}} \right] dt. \tag{1}$$

Тогда оценка ущерба описывается следующим выражением:

$$U(X) = KAS, \tag{2}$$

где K — коэффициент пропорциональности, устанавливается эмпирическим путем; A — параметр, определяемый адаптационной способностью экономической системы к воздействию неблагоприятного гидрометеорологического фактора, $A \in [0, 1]$.

Если экономическая система не предпринимает мер для снижения ущерба ($A = 1$), тогда наблюдается максимально возможный ущерб $U_{\max}(X)$:

$$U_{\max}(X) = KS. \tag{3}$$

Если экономическая система обладает кардинальными мерами защиты от неблагоприятных проявлений погоды, то ущерб определяется только затратами на реализацию мер защиты ($A \to 0$).

Будем полагать, что экстремальные проявления погоды способны привести к нарушению устойчивости экономической системы, если ущерб от их проявлений $U(X)$ больше определенного уровня $U_{кр}(X)$.

Допускается, что при $A = 1$ катастрофический ущерб возможен, если метеорологический фактор X превышает установленное критическое значение $X_{кр}$ в течение периода времени t не менее $T_{кр}$. Применение мер защиты ($A < 1$) позволяет допускать увеличение интервала $T_{кр}$.

Оценка гидрометеорологических рисков сводится к оценке двух составляющих — оценки опасности (вероятности возникновения неблагоприятных гидрометеорологических условий) и оценки уязвимости (оценки возможного ущерба при реализации неблагоприятных гидрометеорологических условий). Особенно важно правильно учесть степень воздействия неблагоприятных гидрометеорологических условий на этапе принятия стратегических решений при планировании развития территорий.

Исследуя возможные реализации случайного процесса $X(t)$ на данной территории за достаточный период времени, можно определить наиболее характерные сценарии процесса. Климатические изменения будут приводить к отклонениям от типовых сценариев и потребуют совершенствования мер защиты.

На основании накопленной информации о возможных реализациях случайного процесса и их экономических последствий можно дать климатическую оценку риска R [4]:

$$R = Q\left[X(t) > X_{пор} \right] U(X), \tag{4}$$

где $Q\left[X(t) > X_{пор}\right]$ — вероятность превышения порогового значения метеорологического фактора $X_{пор}$ случайной функцией $X(t)$, описывающей поведение этого фактора во времени.

При условии стационарности исследуемого процесса на временном интервале τ в качестве оценки риска $Q\left[X(t_k) > X_{пор}\right]$ в момент времени t_k может быть использована прогнозная оценка вида [3]:

$$Q\left[X(t_k) > X_{пор} \right] = \left(1 - \Phi\left\{ \frac{X_{пор} - m_X - r_X(\tau)\left[X_i - m_X\right]}{\sigma_X \sqrt{1 - r_X^2(\tau)}} \right\} \right), \tag{5}$$

где $\Phi\{...\}$ — функция Лапласа; m_X — математическое ожидание случайного процесса $X(t)$; $r_X(\tau)$ — автокорреляционная функция; σ_X — среднеквадратическое отклонение; X_i — текущее (фактическое) значение метеорологического фактора в момент времени t_i; $X(t_k)$ — ожидаемое значение метеорологического фактора в момент времени t_k; τ — ширина временного интервала:

$$\tau = t_k - t_i, \tag{6}$$

где $i < k$.

В общем случае, гидрометеорологические риски связаны не только с наступлением неблагоприятных условий погоды, но и с их ожиданием. Использование прогнозов погоды позволяет снизить риск появления ущерба по гидрометеорологическим причинам относительно климатических оценок, но не избежать его полностью — возникают *риски менеджмента*, которые обусловлены проблемой выбора оптимального управленческого решения в соответствии с принципом максимизации ожидаемой полезности, учитывающим неопределенность реализации прогноза состояния гидрометеорологической среды.

Управление гидрометеорологическими рисками осуществляется в системе «территория – экономика – природная среда» [10, 11], при этом важную роль играет процесс адаптации (приспособления) экономической деятельности к возможным неблагоприятным проявлениям гидрометеорологической среды. В процессе адаптации выделяют этапы [7]:

- *разработки защитных мероприятий*, дифференцированных в зависимости от интенсивности I ($I \sim \Delta X$) и продолжительности T воздействующего метеорологического фактора;
- *реализации защитных мероприятий* при ожидании неблагоприятной погоды.

Задача оперативного управления рисками ущерба от неблагоприятных гидрометеорологических условий представляет собой циклически повторяющийся процесс принятия решения на основании информации об ожидаемом состоянии погодных условий. Решение данной задачи сводится к разработке алгоритма действий лица, принимающего решения, по управлению процессом адаптации к неблагоприятным условиям погоды, направлено на минимизацию ущерба по гидрометеорологическим причинам и содержит следующие последовательные этапы:

- определения уровня воздействия метеорологического фактора X на заданный момент времени t_k: если ожидается, что значение метеорологического фактора превысит пороговое значение $X(t_k) > X_{\text{пор}}$, то определяются процессы, направленные на уменьшение последствий данного воздействия до заданного (минимального) уровня $U_{\min}(X)$ — выбор функции управления;
- реализации функции управления — выполнение запланированных работ, направленных на снижение воздействия неблагоприятной погоды. Реализация мер защиты требует заблаговременности, на момент наступления неблагоприятной погоды t_k меры защиты должны быть реализованы;
- в момент времени t_k сбор информации о фактическом состоянии метеорологических параметров и контроль результатов, получившихся в ходе реализации защитных мер на основе количественных показателей; выявления и анализа отклонений фактических результатов от запланированных, установление причин отклонений;
- принятия мер по устранению причин отклонений, изменения в планировании и распределении ресурсов на следующий момент времени t_{k+1} с учетом реализации фактической погоды и уточненного прогноза.

Таким образом, для эффективного управления гидрометеорологическими рисками необходимо создание информационных систем поддержки принимаемых решений [6], включающих: а) базы данных корреляции прогнозируемой и фактической

погоды по времени и пространству; б) информацию о возможных экономических последствиях управленческих решений, обусловленных влиянием погоды на соответствующей территории.

Такой подход к управлению рисками позволит оптимизировать процесс выбора решения, удовлетворяющего целевой функции — снижению экономического ущерба, наносимого неблагоприятными гидрометеорологическими условиями на исследуемой территории, и будет способствовать достижению устойчивых результатов финансово-хозяйственной деятельности региона.

Развитие предложенной модели оценки влияния отдельного метеорологического фактора на экономическую систему предполагается проводить в направлении учета рисков при воздействии вектора погодных факторов

Литература

1. *Истомин Е.П., Фокичева А.А.* О некоторых вопросах управления территорией с учетом нестабильности климатической системы // Информ. технол. и сист.: управление, экономика, транспорт, право. 2014. № 3 (14). — С. 62–66.
2. *Истомин Е.П., Соколов А.Г., Фокичева А.А.* О некоторых вопросах управления гидрометеорологическими рисками // Мат-лы 9-й межд. науч.-пр. конф. «Анализ, прогноз и упр. природ. рисками в совр-м мире, ГЕОРИСК-2015». — М.: РУДН, 2015. Т. 2. — С. 170–176.
3. *Истомин Е.П., Слесарева Л.С.* Применение стохастических моделей для прогнозирования рисков в геосистемах // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 17. — С. 145–149.
4. *Карлин Л.Н., Абрамов В.М.* Управление энвиромен тальными и экологическими рисками. — СПб.: РГГМУ, 2006. — 332 с.
5. Повышение защищенности от экстремальных метеорологических и климатических явлений // Женева, Швейцария. 2002. ВМО. № 936. — 36 с.
6. *Фокичева А.А., Рыбанова А.Ю., Коршунов А.А.* Обеспечение гидрометеорологической безопасности в нестабильных климатических условиях на примере адаптации автотранспортной системы к неблагоприятной погоде // Метеорология и гидрология. 2014. № 11. — С. 36–44.
7. *Хандожко Л.А., Коршунов А.А., Фокичева А.А.* Выбор оптимального погодо-хозяйственного решения на основе прогноза опасных гидрометеорологических условий // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. — С. 5–17.
8. *Хандожко Л.А., Коршунов А.А., Фокичева А.А.* К вопросу о гидрометеорологической уязвимости России // Учен. зап. РГГМУ. 2006. № 3. — С. 152–163.
9. Чрезвычайные ситуации в России, обусловленные погодными условиями [Электронный ресурс]. — URL: http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/150-chs-v-rosii
10. *Istomin E.P., Sokolov A.G., Abramov V.M., Gogoberidze G.G., Popov N.N.* Geoinformation management as a modern approach to the management of spatially-distributed systems and territories // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015, www.sgem.org, SGEM2015 Conference Proceedings, June 18–24, 2015, book 2, vol. 1, p. 607–614. — DOI:10.5593/SGEM2015/B21/S8.076.
11. *Istomin E.P., Sokolov A.G., Abramov V.M., Gogoberidze G.G., Fokicheva A.A.* Methods for external factors assessing within geoinformation management of territories // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015, www.sgem.org, SGEM2015 Conference Proceedings, June 18–24, 2015, book 2, vol. 1, p. 729–736. — DOI:10.5593/SGEM2015/B21/S8.092.
12. Valuing Weather and Climate: Economic Assessment of Meteorological and Hydrological Services (WMO-No. 1153). — World Meteorological Organization, 2015. — 286 p.

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

И.Д. Воропаева, М.Б. Шилин

ОПЫТ МОРСКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

I.D. Voropaeva, M.B. Shilin

MARINE SPATIAL PLANNING IN THE RUSSIAN FEDERATION: EXAMPLE OF THE BALTIC SEA AREA

В статье выполнен анализ зарубежных и российских подходов к планированию деятельности в акватории на примере Финского залива. Представлены результаты разработки предложений для морского пространственного планирования в российской части акватории Финского залива.

Ключевые слова: морское пространственное планирование, морехозяйственная деятельность, политика пространственного развития.

This article gives an analysis of foreign and Russian approaches to planning activities in the waters of the Gulf of Finlandtaken as an example. Proposals for development of marine spatial planning in the Russian part of the Gulf of Finland are developed.

Keywords: marine spatial planning, maritime activities, the policy of spatial development.

Введение

Балтийское море омывает девять экономически развитых стран. В его акватории и прибрежной зоне сосредоточены различные человеческие интересы, причем зачастую это приводит к конфликтам разных природопользователей [1–3, 6]. Для того чтобы найти равновесие между промышленным ростом и экологической безопасностью, в последние десятилетия активно разрабатывается комплексный подход к управлению морской акваторией с использованием методов морского пространственного планирования (МПП). Это делает актуальным любое исследование в области МПП.

В Российской Федерации понятия «целостный подход к морской деятельности» и «комплексность развития приморских территорий и прибрежных акваторий» определены новой редакцией Морской доктрины (2015 г.) [4]. Однако существует целый ряд проблем нормативного, организационного и методического плана, препятствующих

внедрению этих понятий в правовое поле Российской Федерации. Целью настоящей работы является разработка предложений для МПП российской части акватории Финского залива.

Анализ зарубежных подходов к морскому пространственному планированию

В июле 2014 г. Европейский парламент принял Директиву 2014/89/ЕС (Директива Европейского Совета о морском пространственном планировании), официально вступившую в силу 18 сентября 2014 г. Основная цель данной директивы — обеспечение всех морских районов стран ЕС согласованными планами морского пространственного плавания (МПП), которые будут поддерживать устойчивое развитие морских энергетических секторов, морского транспорта, рыболовства и аквакультуры, а также защищать и улучшать состояние окружающей среды.

Согласованность действий различных природопользователей должна быть обеспечена в границах отдельных региональных морей и выделяющихся в их контексте отдельных морских бассейнов, а также вдоль береговой линии в рамках всей системы «суша – море». Для Балтики «отдельные морские бассейны» — это Ботнический залив, Финский залив, собственно Балтийское море, Датские проливы, а также такие субрегионы, как Калининградский/Вислинский заливы и Щецинский залив.

В директиве указываются пять минимальных требований к МПП:

- учет взаимного влияния «суша – море»;
- учет экологических, экономических и социальных аспектов, а также аспектов безопасности;
- поддержка согласованности между морским территориальным планированием и другими процессами (как формальными, так и неформальными) — такими, как комплексное управление прибрежными зонами (КУПЗ);
- обеспечение участия всех заинтересованных сторон;
- сотрудничество между государствами — членами ЕС и продвижение сотрудничества с третьими странами [8].

Ожидается, что внедрение МПП в практику управления государствами — членами ЕС будет способствовать совершенствованию природоохранного законодательства ЕС и обеспечит согласованное развитие береговой и морской составляющих европейской промышленности [10].

В течение многих лет развитием пространственного планирования, в том числе морского, в регионе Балтийского моря занимается Комитет по пространственному планированию и развитию региона Балтийского моря межправительственной организации «Видение и стратегия вокруг Балтийского моря» (ВАСАБ), действующей под эгидой Совета государств Балтийского моря [8]. Для реализации морского пространственного планирования в акватории Балтийского моря группой ВАСАБ были осуществлены мероприятия:

- начало работы совместной группы ХЕЛКОМ-ВАСАБ в 2010 г.;
- принятие 10 основополагающих принципов для внедрения МПП в акватории Балтийского моря в 2010 г.;
- непрерывный обмен знаниями о передовой практике в МПП;

– обмен опытом, накопленным в рамках экспериментальных мероприятий по разработке трансграничных планов (План Ботния, план для исключительной экономической зоны Германии) [11].

Ниже перечислены десять основополагающих принципов для внедрения МПП в акватории Балтийского моря:

1) устойчивое управление;
2) экосистемный подход;
3) долгосрочное планирование деятельности;
4) принцип предосторожности деятельности;
5) участие общественности и прозрачность в принятии управленческих решений;
6) создание баз актуальных данных;
7) транснациональная координация и консультации;
8) взаимно увязанное наземное и морское пространственное планирование;
9) учет географических особенностей региона при комплексном планировании;
10) непрерывное планирование.

В настоящие время ни одна из стран региона Балтийского моря не имеет утвержденных морских пространственных планов.

Анализ российских подходов к планированию деятельности

В России пространственное планирование подразделяют на два типа: *стратегическо* и *территориальное* [3]. Они, хотя и имеют определенные сопряжения, готовятся в виде самостоятельных документов. До недавнего времени разработку документов территориального планирования курировало Министерство регионального развития Российской Федерации, а документов стратегического планирования — Министерство экономического развития Российской Федерации.

Каждый из этих типов пространственного планирования играет свою роль в формировании региональной экономической политики. Стратегическое планирование определяет условия и возможные сценарии развития, а территориальное планирование — возможности использования территории и условия расположения объектов. Кроме того, стратегические и территориальное планирование охватывают различные сферы деятельности. Стратегическое планирование вместе с экономическим развитием обеспечивает социальное развитие. В то же время к сфере территориального планирования, обеспечивающего функциональное деление территории, относится определение направлений пространственного развития сети населенных пунктов, что имеет мало общего со стратегическим планированием [8].

Стратегией развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 2205-р, предусмотрено развитие такого вида хозяйствования на море, как «комплексное управление морским природопользованием». Для решения данной цели Стратегия предлагает «использование и развитие инструментария морского пространственного планирования» [4]. Так, в Стратегии поставлена задача перехода от отраслевого (секторального) к комплексному (интегральному) планированию развития приморских территорий и прибрежных акваторий страны путем выделения их в отдельный единый объект государственного

управления, что предусматривает разработку и реализацию программ комплексного развития приморских территорий и прибрежных акваторий. Разработка и выполнение таких программ включены в механизм реализации «Стратегии социально-экономического развития Северо-Западного федерального округа на период до 2020 года» [5].

Стратегия развития морской деятельности включает МПП в число перспективных путей развития управления морским природопользованием. В соответствии со Стратегией развития морской деятельности Минэкономразвития России в рамках Федеральной целевой программы «Мировой океан» были подготовлены предложения по структуре и содержанию прибрежно-морского компонента типовых макетов стратегий и программ социально-экономического развития приморских субъектов РФ и программ развития приморских муниципальных образований.

Также Минэкономразвития России были подготовлены методические документы и рекомендации по созданию отечественной нормативно-правовой базы в сфере разработки схем морского акваториального (пространственного) планирования как эффективного способа функционального зонирования и стратегической оценки возможностей использования морских акваторий, сопряженных с документами территориального планирования Российской Федерации и пересекающихся с соответствующими документами Евросоюза [8].

Распоряжением Правительства РФ №2 590-р запланирована подготовка проекта Федерального закона «О морском планировании в Российской Федерации» [9]. Однако в связи с упразднением Минрегиона России (ответственного за разработку проекта) работа над законопроектом завершена не была.

В 2014 г. произошло два важных события, а именно: вступление в силу Федерального закона Российской Федерации № 172 ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» и упразднение Министерства регионального развития Российской Федерации и передачи части его функций Министерству экономического развития Российской Федерации. Благодаря этому в России формируется новая система пространственного планирования, в которой стратегическое и территориальное планирование будут теснее связаны между собой (благодаря одному курирующему федеральному ведомству), а также будет обеспечиваться единообразие разрабатываемой документации на всех территориальных уровнях [8].

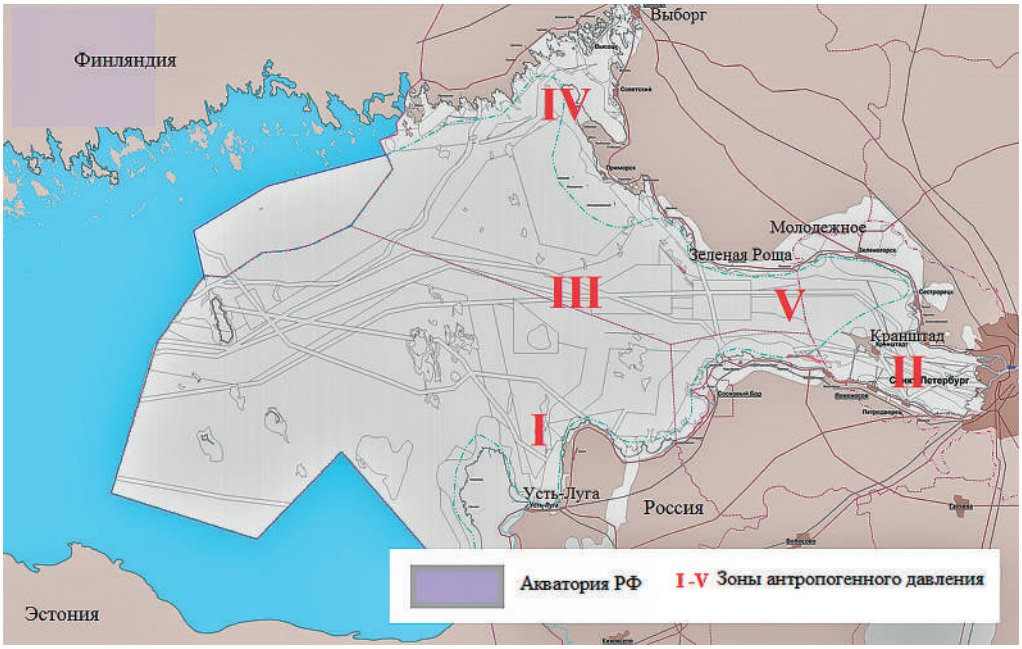
Целесообразно закрепить подходы комплексного управления морским природопользованием в разрабатываемом в настоящее время законопроекте «О государственном управлении морской деятельностью РФ» (Минобороны России — министерство, ответственное за подготовку и сопровождение законопроекта). Это способствовало бы выполнению плана законодательной работы по приведению российской нормативной правовой базы в соответствие с нормами Организации экономического сотрудничества и развития, касающимися комплексного управления прибрежными зонами [1–3].

Предложения по морскому пространственному планированию для российской части Финского залива

По результатам анализа антропогенной активности в российской части Финского залива были выявлены следующие основные виды хозяйственной деятельности:

– морское недропользование;
– сооружение и обслуживание подводных инженерных коммуникаций;
– судоходство и портовая деятельность;
– промышленное рыболовство;
– намыв новых территорий;
– деятельность военно-морских сил;
– дноуглубление;
– сброс в воды залива сточных вод от населенных пунктов и предприятий;
– туристско-рекреационная деятельность.

Проанализировав территориальное расположение антропогенного давления на экосистему акватории российской части Финского залива, по уровню техногенного давления можно выделить следующие зоны (см. рис.).



Зоны антропогенного давления на экосистему российской части Финского залива

Первая зона, в которой акватория испытывает максимальное техногенное давление, –это экосистема Лужской губы, где проводятся ремонтное дноуглубление на подходных путях к порту Усть-Луга, намыв новых территорий под терминалы порта Усть-Луга, сброс грунта в подводные отвалы.

Вторая зона — экосистема южной части Невской губы, непосредственно перед дамбой Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС), где осуществляются капитальное дноуглубление и намыв территорий для создания аванпортов Бронка и Ломоносов.

Третья зона — зона техногенного давления на экосистему всего Финского залива, включая Невскую губу, на судоходных путях (каналах и фарватерах) в районах прохождения судов различных типов, являющихся источниками гидроакустических шумов и различного рода сбросов.

Четвертая зона — экосистема Финского залива в местах расположения якорных стоянок, а также многофункциональных перегрузочных комплексов, также являющихся источниками гидроакустических шумов и различного рода сбросов с судов.

Пятая зона — прибрежная экосистема всего Финского залива, включая Невскую губу, где техногенное давление оказывается при осуществлении промышленного рыболовства.

Проведенный анализ по выявлению зон максимального техногенного давления на экосистему российской части Финского залива позволяет сформировать перечень мер и предложений по минимизации выявленного негативного воздействия развития отраслей народного хозяйства в заливе. Так, при проведении работ по намыву территорий, дноуглубления и сбросе грунта в подводные отвалы необходимо: а) в случае их одновременного выполнения производить работы на таком удалении друг от друга, чтобы мутьевые облака, вызванные разными источниками, не накладывались друг на друга; б) не допускать выполнения данных работ в период нереста рыб в Невской губе; в) не допускать непрерывного выполнения данных работ в течение срока, при котором происходит длительное замутнение больших пространств акватории (ориентировочно 2 и более месяца); г) для снижения факторов беспокойства руководствоваться Постановлением Правительства РФ «Об утверждении требований по предотвращению гибели объектов животного мира при осуществлении производственных процессов, а также при эксплуатации транспортных магистралей, трубопроводов, линий связи и электропередачи» [7].

Заключение

Основные выводы в работе видятся в следующем.

В настоящие время ни одна из стран региона Балтийского моря не имеет утвержденных и реально действующих морских пространственных планов.

Законодательная база РФ в области МПП в настоящий момент находится на этапе формирования.

Антропогенная нагрузка на акваторию и вероятность конфликтов между природопользователями резко возрастают в выявленных зонах пересечения различных отраслей хозяйственной деятельности, что необходимо учитывать при осуществлении операции МПП.

Литература

1. *Альхименко А.* Морская транспортная инфраструктура и городская среда: экологические аспекты планирования // Сб. мат. XVI Международ. экол. форума «День Балтийского моря». — СПб.: ООО «Свое издательство», 2015. — 337 с.
2. *Жигульский В.А., Шилин М.Б., Царькова Н.С., Коузов С.А.* Состояние гидробиологических сообществ района аванпорта Бронка после окончания дреджинговых работ (осень 2015) // Учен. зап. РГГМУ. 2016. № 43. — С. 208–222.

3. *Кононенко М., Шилин М.* Стратегии планирования в комплексном управлении прибрежной зоной. — СПб.: РГГМУ, 2003. — 151 с.
4. *О Стратегии* развития морской деятельности в РФ до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 08.12.2010 № 2205-р [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс — надежная правовая поддержка. — Офиц. сайт компании «КонсультантПлюс». — М., 2010. — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_107955/
5. *Об утверждении* Плана мероприятий по реализации Стратегии социально-экономического развития Северо-Западного федерального округа на период до 2020 года: Распоряжение Правительства РФ от 16.10.2012 № 1939-р (ред. от 11.02.2015) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс — надежная правовая поддержка. — М., 2012. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_136766/301a57ab8d4a9c34f7f5f2eb0aaa8c3f2633cc89/
6. *Плинк Н.Л., Гогоберидзе Г.Г.* Политика действий в прибрежной зоне. — СПб.: РГГМУ, 2003. — 226 с.
7. *Постановление* Правительства РФ от 13.08.1996 № 997 «Об утверждении Требований по предотвращению гибели объектов животного мира при осуществлении производственных процессов, а также при эксплуатации транспортных магистралей, трубопроводов, линий связи и электропередачи» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс — надежная правовая поддержка. — М., 2016. — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_11496/
8. *Пространственное* планирование как инструмент координации развития портов и гаваней Калининградского/Вислинского залива / под ред. Г.М. Федорова, В.А. Гриценко и др. — Калининград: Изд-во БФУ им. Канта, 2015. — 102 с.
9. *Распоряжение* Правительства РФ от 05.02.2016 № 164-р «Об утверждении Стратегии действий в интересах граждан старшего поколения в Российской Федерации до 2025 года» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс — надежная правовая поддержка. — М., 2016. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_193464/
10. *Эйлер Ч.Н.* Обзор мирового опыта в области морского пространственного планирования: отчет для Рабочей группы по морскому пространственному планированию Всемирного фонда дикой природы (WWF). 2014. — 136 с.
11. Maritime Spatial Planning [Electronic resource] // VASAB — vision and strategies around the Baltic sea. — URL: http://www.vasab.org/index.php/maritime-spatial-planning

М.Г. Лазар

РЕФОРМА ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ — ИТОГИ И ПОСЛЕДСТВИЯ ГЛАЗАМИ СОЦИОЛОГИИ ОБРАЗОВАНИЯ

M.G. Lazar

REFORM OF HIGHER EDUCATION IN RUSSIA: RESULTS AND CONSEQUENCES THROUGH THE EYES OF SOCIOLOGY OF EDUCATION

Статья анализирует осуществленную в России реформу высшего образования в рамках Болонского Соглашения, ее состояние и последствия, процесс перехода к двухуровневому образованию в университетах, процесс их сокращения, укрупнения и перехода к новому типу управления. Исследуются отличия высшего образования России от европейского и американского, суть компетентностного подхода в подготовке специалистов, его пригодность для российской реальности. Анализируются положительные и негативные последствия реформы.

Ключевые слова: реформа высшего образования, Болонский процесс, компетенции, кредитная система, проект «5-100-20», мобильность студентов, наукометрические оценки, последствия реформы.

The article analyses carried out in Russia the reform of higher education in the framework of the Bologna Agreement, her condition and consequences, the process of transition to education with two levels in universities, the process of reduction, consolidation and transition to a new management style. We investigate the differences of higher education of Russia from European and American education, the essence to competential approach in training, its suitability for the Russian reality. Analyzes positive and negative effects of the reform.

Keywords: Higher education reform, Bologna process, the competence, the credit system, the project "5-100-20", the mobility of students, the scientometric evaluation, the effects of the reforms.

Введение

В системе высшего образования России, в которой учились в конце 1980-х гг. 2,6 млн студентов в 457 государственных вузах, после распада СССР начался противоречивый процесс, в котором сочетаются две противоположные тенденции. Одна проявилась в том, что в 90-х годах количество университетов сильно выросло в результате массового превращения институтов и даже техникумов в университеты и академии, так что в начале 2000-х гг. насчитывалось уже 593 государственных и 487 негосударственных вузов и около 7 млн студентов [1]. Другая тенденция стала проявляться с 2003 г., после формального присоединения России к Болонскому процессу, когда начался обратный процесс — резкого сокращения количества государственных и негосударственных вузов и их филиалов путем закрытия или объединения (укрупнения), особенно на

региональном уровне, с целью создания крупных научно-образовательных центов, насчитывающих 10–15 тыс. и более студентов. Объявленная задача реформы — доведение общего количества вузов по всей России до 50 исследовательских ведущих университетов и до 150–200 — остальных типов вузов, при сокращении числа специальностей по стране с 670 до 50, — процесс, который еще продолжается. Согласно концепции Федеральной целевой программы развития образования на 2016–2020 гг., число вузов сократится на 40 %, а их филиалов — на 80 %. При этом реформа высшего образования протекает на фоне ежегодного сокращения бюджетного финансирования науки и образования в масштабах страны, в условиях смены типа общественного строя, перехода экономики от так называемого планового хозяйствования к «рыночным» отношениям.

В связи с этим в России многие люди задаются вопросом: в чем смысл создания стольких университетов? Ведь в России университеты никогда не были решающим источником научно-технического прогресса, а наукой — фундаментальной и прикладной — занималась Академия наук и отраслевые академии и НИИ. Возможно, так воплотились либеральные идеи свободы, мечты начала 90-х гг. прошлого века. Конечно, Россия переживает сложнейший период трансформации всего общества, поэтому были необходимы структурные изменения и в системе среднего и высшего образования. Работая на перспективу, любая власть стремится, в принципе, учитывать свой и чужой опыт прошлого. Но этот опыт, как показывает практика вхождения России в Болонский процесс, может оказывать и медвежью услугу.

На начало 90-х гг. страна имела развитую индустриальную базу, образованное население, квалифицированные научно-технические кадры, — интеллектуальный потенциал, достаточный для успешного развития. Успех дела обеспечили бы экономическая востребованность новых технологий, научных разработок, инвестиции со стороны государства и крупного бизнеса, то есть нормально функционирующие экономические механизмы, реальная конкурентная среда, наличие правового поля и достойное вознаграждение труда создателей инновационного продукта. Но, как часто в России бывало, все вышло наоборот. Вместо развития и обновления производства появились «экономика спада», системный кризис; вместо научно-технического прогресса — развал отраслевой и фундаментальной науки, резкое сокращение их финансирования, «утечка мозгов» на Запад; вместо цивилизованного рынка — криминальная экономика и передел государственной собственности в пользу бывшей элиты; вместо востребованности инноваций — полное равнодушие к ним новых собственников, переход к сырьевому варианту развития страны и перевод капиталов в зарубежные оффшоры. Западный опыт построения развитого капитализма не был творчески применен к российским условиям, а произошло его карикатурное копирование.

«Круглый стол» европейских промышленников, объединяющий 47 крупнейших европейских корпораций, разработал международный проект «Глобальное образование» и представили ЮНЕСКО как модель для всего мира. Поскольку в России основные направления внутренней политики определяются сейчас представителями российского филиала транснационального крупного бизнеса, они навязывали эту модель и России. Лейтмотив этого проекта — превращение образования в высокорентабельную сферу бизнеса, где вместо знаний утверждаются компетенции и навыки, где планируется отмена бюджетного системного финансирования высшего и среднего

образования. В России — это Форсайт-проект «Образование-2030», разработанный сколковскими управленцами от науки и образования, конечная цель которого — ликвидация к 2030 г. национальных традиционных моделей образовательных систем и переход на глобальные образовательные платформы. Ближайшая цель, частично уже осуществленная, — уход государства из сферы образования, за исключением административных функций, военного образования, и приход в него «инновационного бизнеса». Средством осуществления этих целей является реформа высшего образования в духе Болонской декларации 1999 г.

Задачей данной статьи является анализ достигнутых результатов в процессе реформирования вузов России после подписания Болонских соглашений и их уродливого воплощения, анализ перспектив развития высшего образования с учетом реалий 2016 г., оценка целей реформы с позиций государственной безопасности и реальных потребностей страны в специалистах высокой квалификации.

Задачи реформы высшего образования и их реализация

Хотя Россия формально присоединилась к Болонской декларации в 2003 г., реально она лишь 15 февраля 2005 г. показала свою готовность начать реформу, когда приказом Минобрнауки был утвержден соответствующий «План мероприятий по реализации положений Болонской декларации в системе высшего профессионального образования РФ на 2005–2010 годы». Наиболее радикальным моментом реформы стало разделение университетов РФ на несколько групп. Первые три группы состоят из сорока университетов-лидеров: а) два элитных университета с особым статусом — МГУ и СПбГУ; б) девять федеральных университетов, представляющих федеральные округи РФ; в) 29 национальных исследовательских университетов (НИУ), статус которым присваивается на 10 лет. «Цели, поставленные перед ведущими университетами (элитными, федеральными, НИУ), значимы: повышение качества научных исследований, реформы системы управления, налаживание взаимосвязей между наукой и бизнесом, повышение качества образовательных услуг и, наконец, интернационализация» [3, с. 11]. В будущем в высшую лигу НИУ могут войти 40–50 университетов, которые будут поставлять кадры в другие 150–200 вузов России. А в 2007 г. Госдума РФ утвердила законопроект правительства о введении в России двухуровневой системы (с 1 сентября 2009 г.) по новым стандартам и программам обучения (так называемые стандарты третьего поколения). Как видим, с опозданием на 5 лет несмотря на существенные различия российского среднего и высшего образования от стран Европы чиновники от науки решили догнать Европу, в которой в 80–90 гг. XX в. стал популярным новый государственный менеджмент (New Public Management).

С точки зрения этой концепции, высшее образование является управляемой системой, в которой рыночные силы взаимодействуют между собой под внешним контролем государства и институциональных менеджеров [17, с. 270]. В Европе университеты давно подвергались критике за чрезмерную свободу действий и отсутствие связи с рынком труда, поэтому там наблюдается переход от традиционной гумбольдтской модели исследовательского университета, возникшей в начале XIX в., к так называемой модели *университета третьего поколения*. В результате там возникло понятие

предпринимательского университета как бизнес-модели. Деятельность университетов (наподобие организаций в сфере бизнеса) должна быть прозрачной и оцениваться с помощью четких индикаторов и параметров, отражающих успехи в производстве и накоплении финансовых ресурсов, объем привлеченных средств из фондов, из сферы бизнеса, объем человеческого капитала (количество преподавателей с научными степенями, количество студентов), уровень репутационного капитала (престиж, статус) [5, с. 107–109]. Здесь легко узнать некоторые критерии оценки «эффективности университетов» в России, разработанные чиновниками от высшего образования. Существует масса мнений против отношения к университетам как к бизнес-акторам, а к студентам — как к клиентам, получающим услуги, но применение этой модели становится все более распространенной в Европе и, к сожалению, в России, в которой, увы, нет рыночных отношений европейского типа, а крупный бизнес работает часто вне правового поля. Зато рейтинги университетов, как будет показано ниже, становятся одним из важнейших критериев эффективности новой бизнес-модели обучения.

Однако прежде чем кратко проанализировать достижения этого процесса в России, отметим, что *смысл Болонского процесса для вузов Европы состоял в подготовке специалистов, которые были бы конкурентоспособными на американском рынке труда*, следовательно, на деле для России речь идет не столько о вхождении в Европу, сколько о подготовке специалистов, способных, как и европейцы, конкурировать с американскими выпускниками. Этот аспект часто затушевывается при анализе Болонского процесса. Реалии 2016 г. показывают, однако, что Россию не только не ждут или приглашают в Евросоюз, а скорее наоборот, всеми способами отторгают от себя, ограничивая возможности ее развития и модернизации. Тогда возникает вопрос: во имя чего были разрушены традиции и вся система отечественного высшего образования?

В статье 2009 г. в данном журнале мы отмечали, что шансы качественной реализации требований Болонской декларации в России за указанный срок маловероятны в силу ряда причин [7]. Во-первых, несмотря на то что в Европе существуют множество схожих элементов в системе среднего образования, длящегося там 12 или 13 лет, в системе подготовки специалистов высшей квалификации там тоже возникли проблемы, которые и породили Болонскую декларацию 1999 г. Одиннадцатилетнее среднее образование России, отличающееся от европейского, имеет также ряд особенностей, которые еще больше затрудняют указанный процесс перехода к двухступенчатому высшему образованию. Кроме того, у нас многими чиновниками от образования и самими преподавателями вузов реформа до сих пор понимается упрощенно, как переход к двухуровневой системе «бакалавриат + магистратура» и как совмещение, сближение университетских программ. Кроме двух уровней есть высший, третий уровень — докторантура. Пока же мы имеем и бакалавров, и специалистов с магистрами, и кандидатов, и докторов наук, и полученные в зарубежных университетах степени PhD. Но это лишь внешняя сторона процесса.

На деле *в Европе существует принципиально иная система оценки полученного образовании — кредитная*: от затратных временных единиц измерения Европа перешла к условным единицам, «кредитам», в которых объем образования на первых двух уровнях образования оценивается по иной методологии, чем в России. Каждый год там «весит» 60 кредитных единиц, поэтому первому диплому (бакалавра) соответствует

180 «кредитов», а второму (магистра) — еще 120. За каждой такой единицей стоит определенное количество освоенных понятий, связей между понятиями, наработанные навыки [2, с. 102]. Каждая дисциплина «весит» 4–6 кредитных единиц, две третьи зачетных кредитов составляют обязательные дисциплины, остальные — дисциплины по выбору. Добавим, бакалавриат у нас предполагает 4 года обучения, что уже порождает отличия.

Другая группа сомнений связана *с различиями в идеологии* высшего образования России и Европы: в европейских странах стандарты и оценки образования основаны на *компетентностном подходе* к процессу образования, в то время как традиции российских вузов основаны на оценке знаний, достижений в обучении. Компетенция в документах ЕС определялась как прирожденная *склонность* (одаренность), *способность* (как свойство личности) и как *умение*, *навыки*, подход, который предполагает постоянный учет изменяющихся потребностей общества и работодателей [14, с. 138–139]. Речь идет, по мнению цитированного автора, о некоем образце, эталоне, о модели готового «продукта» образовательного процесса, которого ждет общество, об идеале выпускника и в меньшей степени о его профессиональных знаниях. «Можно сказать, компетенции в документах Европейского Союза *отражают кодекс идеального служащего, разработанный и утвержденный сообществом работодателей*» [там же, с. 139], или, как сказал руководитель программы «Молодые профессионалы» Агентства стратегических инициатив Д. Песков, «человек одной кнопки». Этот новый продукт образования — не личность, способная рассуждать, думать, принимать самостоятельные решения, а робот. Сегодня бизнесу нужен тот, кто обладает только определенными компетенциями и навыками, необходимыми работодателю. Реформа ориентирует студента и преподавателя не на *обучение мышлению, а заменена обучением навыкам*. Результатом образовательного процесса станет, поэтому, *не творческая личность, генератор идей, творец, а исполнитель, потребитель идей*. А ведь образование — это сфера, в которой личность воздействует на личность. В системе высшего образования сейчас возможна дрессировка, даже обучение, но не образование. Реформа существенно уменьшает объем фундаментальных знаний, даваемых вузами России до реформы, в угоду узкопрофессиональных умений, знаний частичного характера.

Навязанная России европейская идеология компетенций является, как будет показано ниже, ***идеологией прибыли, идеологией конкуренции университетов на ниве оказания платных образовательных услуг*** ради максимальной прибыли образовательного учреждения при подготовке специалистов для рынка труда. Новые федеральные стандарты высшего образования заменили понятия «образование» и «воспитание» понятием «компетенции», которые разрушили общее образовательное пространство. Согласно принятым новым российским стандартам («третьего» и «третьего с половиной поколения») компетенция на уровне учебного процесса осталась инструментом обучения, но не стала инструментом воспитания личности.

В планах факультетов и кафедр вузов России компетенции планируются как динамичная комбинация знаний, понимания, навыков и способностей. Но в нашей стране эти компетенции постоянно видоизменяются, их перечень подвергается новой идентификации, а в ближайшее время предполагается переход к так называемым три с половиной стандартам. Они обрисовывают некий идеал выпускника, эталон готового продукта. Реформе пока не видно конца, что приводит к деградации российского образования,

росту недовольства преподавательского корпуса вузов из-за постоянно растущего «бумажного оборота» в его работе. Как подсчитал ректор одного российского вуза, число документов, «бумаг» возросло по сравнению с концом 80-х гг. в 22 раза [12, с. 92].

В российских вузах за последние 8–10 лет резко сокращено количество лекционных занятий в пользу семинарских, практических, в программах кафедр сильно возрос объем самостоятельной работы студента, которая часто оказывается фикцией в силу низкой оснащенности вузов литературой и компьютерами. В такой ситуации конспекты чего будет проверять преподаватель на зачетах или экзаменах?

Сомнение в успешном выполнении Россией всех пунктов Болонской декларации вызывает и отсутствие в стране рынка интеллектуального труда, осуществляющего контроль качества образования, профессионального уровня выпущенных специалистов с высшим образованием. Несмотря на отдельные попытки мониторинга вузами устройства своих выпускников, учета потребностей рынка труда, несмотря на придуманные чиновниками от образования мудреные методики переаттестации, лицензирования и аккредитации вузов, пока ***в России отсутствует реальный общественный институт контроля над качеством образования***. В Европе и Америке он включает представителей науки, образовательных структур и работодателей в данной отрасли. Речь идет, как читатель догадывается, не о российском чиновничьем Обрнадзоре от министерства образования и науки, проверяющем «по бумагам» состояние образования в вузах страны и дающего им аккредитацию.

По мнению ряда авторов, основным направлением реформирования стало изменение организационно-экономического механизма: преобразуется институциональная природа, статус образовательного учреждения, принципы финансирования, меняется взаимодействие «государство — администрация вузов» и трудовые отношения. До вузов дотянулся неофордизм, основанный на бюрократических технологиях и «выжимание пота». Производство «образовательных услуг» стандартизируется, превращается в поточное производство» [6, с. 122]. В результате активного внедрения «нового государственного управления» усилиями Минобрнауки РФ, «место вуза как “творческой иерархической организации”, как сообщества преподавателей... выбирающих и контролирующих деятельность администрации, занимает место вуз как клиентоориентированная организация, производящая образовательные услуги и нанимающая преподавателей на рынке труда» [там же, с. 123]. Это новое положение руководства вузов как менеджеров, а преподавателей как наемных работников стало оформляться при переходе к новой системе оплаты труда и контрактной системе принятия на работу.

В начале реформы российские власти от образования декларировали вхождение в Болонский процесс как *взаимовыгодный способ* формирования единого европейского рынка высококвалифицированного труда и высшего образования. Но до сих пор обильного потока европейских инвестиций в российское образование и науку не наблюдается, как не видно и ожидаемого роста взаимного финансирования множества совместных образовательных проектов университетов Европы и России. Отдельные примеры нескольких успешных в этом плане университетов в разных регионах страны не меняют общую ситуацию. Зато, как свидетельствуют опросы выпускников российских вузов, значительное их количество планирует эмигрировать в Европу, США

и другие страны. Нам процесс реформирования высшего образования России представляется «игрой в одни ворота», продуманным способом бесплатной подготовки Россией квалифицированных кадров для Европы и США.

В планах реформы предполагалось также, что введение европейской кредитной системы должна способствовать *росту академической мобильности студентов*, включая кратковременное обучение в других университетах, внутри страны и за рубежом. На деле мобильность как внутри страны, так и за рубежом реализуется, но незначительно, чему препятствуют несколько обстоятельств.

Советский диплом о высшем образовании содержал вкладыш с информацией о пройденных по единым для всей страны программам предметах и полученных оценках, к которой в 90-е гг. добавилась информация об общей трудоемкости каждой дисциплины в академических часах. В Европе, как было отмечено, от затратных единиц измерения, основанных на временных интервалах, перешли к условным единицам, названным «кредитами». Возросшая свобода университетов при формировании собственных образовательных программ обучения (что является одним из коренных отличий стандартов третьего поколения от предыдущих) привела к тому, что при переводе студента в другой вуз ему придется дополнительно сдавать множество предметов, которые он не изучал в предыдущем вузе. А если студент уезжает на стажировку в зарубежный университет, то прослушанные им там курсы также плохо согласуются с образовательной программой своего университета. «Таким образом, формально декларируя возможность и необходимость академической мобильности, российское образование не предоставляет соответствующей технологии» [11, с. 115], тем самым реформа не способствует росту мобильности. Выходит, что повышение степени свободы вузов в формировании основных образовательных программ увеличивает количество несхожих и трудно совместимых образовательных программ в разных вузах, близких по направленности. При этом некоторые вузы получили возможность иметь собственные образовательные программы, а это не только разница в учебных планах, но и расхождение в компетенциях. Теоретически это неплохо, но на практике такая несходность в программах снижает возможность перевода студента из одного вуза в другой, то есть усложняет мобильность студентов. А рост мобильности студентов и преподавателей вузов декларировался одним из базовых положений Болонского процесса.

Последствия реформы высшего образования

Вузовская реформа в России предполагает, что останутся только те университеты, которые встраиваются в систему «глобального образования». С 2013 г. уже действует проект «5-100-20», включающий уже 21 российский вуз, по которому к 2020 г. пять российских университетов и институтов должны войти в сотню лучших мировых вузов по неким мировым критериям. Это ключевые стратегические высшие учебные заведения, которые ковали кадры в прошлом для советского ВПК. Данный проект управляется Советом по повышению конкурентоспособности — международным совещательным органом, куда входят 6 человек от России и 7 иностранцев. Среди российских — Герман Греф, бывший министр финансов РФ, председатель Центробанка РФ, и Дмитрий Ливанов, министр образования и науки РФ.

По условиям участия в проекте «5-100-20» необходима фундаментальная трансформация системы образования России в соответствии с международными стандартами Глобальной образовательной платформы, согласно которым в данном университете должен быть определенный процент иностранных специалистов, преподавателей и студентов, треть программ должна быть на иностранном языке, аспиранты должны публиковать свои работы на английском языке в международных журналах. Все эти изменения должны происходить в учебных заведениях, где проводятся секретные работы в интересах обороноспособности страны. Типичный пример — Сколковский центр, где все открыто и прозрачно уходит за рубеж. Не подрывают ли все эти изменения национальный суверенитет и безопасность страны?

Без каких-либо общественных дискуссий о путях и формах реформирования высшего образования власти РФ реализуют широкомасштабные мероприятия по установлению менеджериальной модели образования и академического контракта, основанного на внешнем оценивании преподавателей. Этот «эффективный контракт» не является результатом переговоров вуза и преподавателя, а устанавливается административно-бюрократическими процедурами. «Происходит свертывание академических свобод и увеличивается роль менеджмента вузов, который выводится из-под контроля профессионального сообщества» [6, с. 124].

Идея фикс современных реформаторов образования и науки — перенести центр научно-технического прогресса в России из Академии наук в университеты, как это происходит в США. Но там эта традиция складывалась в течение полутора столетий, в условиях реального, классического капитализма, в то время как в России начиная со времен Петра Великого складывалась иная традиция. В университетах на первое место ставилась подготовка специалистов, осуществляемая учеными, которые параллельно занимались и наукой, а главным координатором и организатором научных исследований являлась Академия наук с момента ее образования, причем и то и другое финансировалось преимущественно из бюджета государства. Это выводит нас на рассмотрение еще одного аспекта реформы в духе указанного проекта «5-100-20»: он касается *измерения достижений вузовских ученых-преподавателей* в области науки.

За последние десять лет наиболее обсуждаемым и применяемым в мире наукометрическим индикатором во всех отраслях науки стал предложенный в 2005 г. американским физиком Хорхе Хиршем и получившим название «индекс Хирша», или h-index, который затмил практически всех остальных. Его удобство заключается в том, что он всегда положительное число, которое не может превышать общее количество опубликованных ученым работ. Проблема в том, что он так же искажает реальную картину статуса ученого и его вклада в науку, как и остальные. Тем не менее и в зарубежных странах, и в России все управленцы от науки пользуются им. Они же, как в кривом зеркале, своими представлениями о том, «кто есть кто» в науке, выносят вердикт относительно значимости того или иного исследователя, НИИ или университета, в виде волевых решений, принятых на базе разных показателей. Вспомним хотя бы недавнее объявление контролерами от министерства образования и науки РФ «неэффективным» вузом Академии балета СПб им. Вагановой.

Одно из требований Болонской декларации состояло в том, чтобы реформирование осуществилось *без разрушения фундаментальных ценностей и традиций национальной*

системы высшего образования. Но в России происходит именно разрушение прежней системы. Смысл проводимых реформ проявился пока в ломке традиционных структур высшего образования, в ломке прежних установок и идеалов системы высшего образования, в навязывании ценностей, несовместимых с ментальностью большинства жителей России [8, с. 55]. Для конструктивного изменения указанной политики властей в области образования (и науки) необходимо радикально поменять их идеологию, то есть изъять из российской идеологии образования установку «на рынок» как кардинальный принцип функционирования. А это весьма непросто, поскольку реального рынка пока нет, как нет и рынка интеллектуального труда.

В высшем образовании России имеются свои традиции: на первое место в вузах все-таки ставится образование, подготовка молодого поколения учеными-педагогами, а занятие наукой находится на втором месте. Поэтому в российских университетах наблюдается подмена целей: главное — не качественная подготовка кадров и развитие науки, а повышение статуса университетов в мировых рейтингах. «Тысячи небездарных людей сегодня ставят перед собой задачу не продвижения в понимании устройства мира, а продвижения “по Хиршу” ... Ведь должности, гранты, “надбавки” — все это определяется числом публикаций, числом ссылок на них, тем же “Хиршем”» [15]. Недаром говорят: «когда достижение показателя становится целью, он перестает быть хорошим показателем». Не спасают ситуацию и многочисленные предложения по улучшению этого индекса, предложенные разными авторами с учетом количества соавторов, уточнения времен опубликования статей и пр. [9]. У России должна быть своя система оценки вклада собственных ученых, не зависимая от других стран, ведь пока английский язык не стал вторым официальным языком РФ. Такой системой в принципе может стать РИНЦ при изменении отношения к ней министерства образования и науки РФ [10].

Первые полтора десятилетия XXI в. развития науки напоминают гонку: за количеством публикаций, за наукометрическими показателями вместо кропотливой, малопривлекательной работы с архивами, с первоисточниками, вместо бесконечных экспериментов, множества проверок результатов опытов. Как отмечал в одном из своих выступлений академик Жорес Алферов, нормальный ученый может опубликовать одну, максимум две статьи за год. Сегодня при такой стратегии нормальный ученый рискует отстать от тех своих коллег, которые, затратив меньше интеллектуальных усилий, напишут и опубликуют в «престижных» журналах по 10–15 статей в год, увеличивая свои «хирши». Вот почему во многих университетах Европы, особенно в Германии, усиливается критика существующих рейтинговых систем, в частности Глобального рейтинга университетов (ГУР). В ответ на критику Совет Европы поддержал создание нового Европейского рейтинга университетов «U-Multirank». Правительство России среагировало и разработало стратегию повышения глобальной конкурентоспособности российских вузов, Программу «5-100-2020», упомянутую выше. В 2013–2014 гг. только МГУ вошел в топ-100 в Шанхайском рейтинге (79-е место) и в топ-200 в рейтинге QS (120-е место) [5, с. 109]. Немаловажную роль в этом сыграл особый статус МГУ и увеличенное финансирование его преподавателей.

Последствия реформы образно описал в своей статье О.Н. Смолин, первый заместитель Комитета Государственной думы РФ: «Ректор с многолетним опытом

рассказывал в Государственной думе, что в 1990-х гг. его вуз работал без юриста, а сейчас целое юридическое управление не справляется с потоком документации, включая отчеты и предписания контролирующих органов. В 2014 г. аккредитацию его вуза проводила комиссия в составе 70 человек! Декан исторического факультета Омского педуниверситета В.Н. Худяков посчитал количество документов, которые ему приходилось заполнять в советский период и в настоящее время: разница составила 22 раза. В вузах нарастает противоречие между управляющими и управляемыми: число преподавателей сокращается при интенсификации их труда, а количество управленцев разного рода, включая юристов и бухгалтеров, увеличивается быстрыми темпами по причине экспоненциально растущего контроля и документооборота» [12, с. 92].

Возникает резонный вопрос: ради чего это делается? Изменит ли указанный проект, как и реформа в целом, бедствующее, нищее состояние большинства университетов страны? Не лучше ли реально обновить оборудование лабораторий, создать нормальные условия работы для ученых-преподавателей во всех вузах страны наподобие европейских или американских, а не копировать чужой опыт, как будто Россия — это Европа или США. Особенности экономики, традиции культуры, финансирования науки, геополитическую роль России в мире обязывают реформаторов учитывать традиции образования и интересы своей страны, а не бездумно копировать американский опыт управления университетами.

Конечно, любая реформа не делается в одночасье, это длительный, противоречивый и неоднозначный для реформаторов (управленцев) и преподавательского корпуса университетов процесс. Как показывают проведенные социологические исследования, внедрения реформы в России и Голландии [3], именно между этими двумя группами — чиновниками от образования и преподавателями вузов — возникает напряжение в процессе институциональных изменений системы образования. Вторая группа — преподавательский корпус университетов, состоящий из специалистов высокого уровня с одной или двумя учеными степенями, презрительно именуется на языке чиновников «пэпэесниками» (от ППС — профессорско-преподавательский состав). «Подозрительное отношение административных служб к преподавателю, которого надо прежде всего «контролировать», значительно осложняет процесс легитимации административных решений, компетентность которых в глазах преподавателей также «подозрительна».

Голландские исследователи данного вопроса В. Халффман и Х. Раддер [Halffman, Radder], применяющие для обозначения этих двух групп метафору «волки» и «овцы», в этой связи замечают: «Менеджмент провозгласил ученых внутренним врагом: ученым нельзя доверять, их надо проверять и контролировать постоянной угрозой реорганизации и увольнения» [цит. по: 3, с. 21]. Это обстоятельство разрушает социальную структуру университета. «Волки» — многочисленные администраторы с помощью различных средств (таблицы, показатели, рейтинги) контролируют смиренных «овец», каждая из которых боится оказаться последней [там же]. Авторы цитированной выше статьи, опрашивавшие преподавателей исследовательских университетов Санкт-Петербурга, задали им вопрос: что больше всего сомнительно и не вызывает признания у них? Полученные ответы таковы: «Во-первых — “забюрократизированность” университетской администрации — самая большая доля респондентов фиксирует

этот негативный момент организационных преобразований (64,3 %); во-вторых — отсутствие механизма вовлеченности преподавателей в решении вопросов учебного процесса (56 %) и, как следствие этого, в-третьих, незначительное влияние преподавателей даже на кафедральном уровне (45 %)» (там же, с. 20–21). Одобрение и участие вызывают «практики международной мобильности» — (53 %), «совершенствование технической оснащенности» — (31,7 %), «увеличение количества исследовательских грантов» — 21,4 % [там же]. В целом, заключают цитированные авторы, положительные последствия реформирования отмечают далеко не «значительное большинство», как они предполагали в начале исследования. В числовом выражении негативные эффекты NPM (нового государственного менеджмента) в науке перевешивают их позитивную оценку [3, с. 21].

Выводы

Реформа высшего образования в России формально завершена: разработаны, неоднократно переработаны (бесплатным трудом преподавателей) и повсеместно внедрены новые программы «третьего поколения», включающие огромное множество документов. Сокращаются многие вузы или их филиалы, а укрупняющиеся вузы перешли на двухступенчатую систему образования. Традиционное для России полноценное пятилетнее высшее образование практически закрывается, что увеличило в стране количество бакалавров, магистров, устранив при этом почти повсеместно «специалитет». С позиций качества образования принудительное объединение вузов способно вызвать отрицательные последствия: «ликвидация различных (в том числе соперничающих) научных школ и направлений при объединении нескольких кафедр в одну; обострение внутривузовской борьбы за административный ресурс (должности проректоров, деканов, заведующих кафедрами и т.п.). В первые годы после объединения эта борьба постоянно отвлекает коллективы от научной и преподавательской работы; снижение управляемости вновь созданными гигантами» [12, с. 96].

Ключевая позиция российских властей при реформировании образования связана с представлениями о том, что падение качества образования связана со значительным ростом количества студентов и вузов в РФ. На деле, по мнению ряда авторов, бюрократизация является главным (после недофинансирования) фактором понижения качества отечественного высшего образования и его деградации. Уровень оплаты вузовских ученых-педагогов и технического оснащения вузов России на порядок ниже по сравнению с их состоянием в странах, чей опыт копируется российскими реформаторами.

Болонская декларация требовала, чтобы реформирование осуществилось без разрушения фундаментальных ценностей и традиций национальной системы высшего образования. Но в России осуществлено именно это — разрушение прежней системы, навязывание ценностей, не совместимых с ментальностью большинства жителей России.

В такой специфической области человеческой деятельности, как образование, направленной на формирование личности специалиста и гражданина, неприменимы принципы финансовой рентабельности, недопустим коммерческий подход. Навязывание рыночных правил функционирования в сфере образования, науки, да и культуры в целом, — это примитивный, гипертрофированный экономический подход.

В российских университетах наблюдается подмена целей деятельности: главной целью стало не качественная подготовка кадров и развитие науки, а повышение статуса университетов в мировых рейтингах вследствие усиливающегося год от года увлечения чиновников от науки наукометрическими показателями. Реформа оплаты труда преподавателей окончательно превращает их в наемных работников, в «винтики производства образовательных услуг», которыми легко управлять. Это подавляет в российских вузах академические свободы, выхолащивает содержание труда преподавателей, лишая его творческого начала, и создает стимулы для бумажной имитации работы, для работы на показатели.

Наукометрия не виновата в злоупотреблении ее достижениями в образовании и науке. Его причины коренятся в отсутствии достаточного для нормального учебного процесса и развития науки *базового финансирования образования и науки*, в скудности технологического перевооружения вузов, зарплат ученых, в отсутствии прозрачности при принятии решений по реформированию науки и образования, в отсутствии развитого гражданского общества и контроля снизу над властью, в том числе и в науке.

В системе среднего и высшего образования сложилась неоднозначная, тревожная тенденция снижения уровня образованности выпускников школ и вузов. В перспективе реформа образования и науки может привести к вырождению фундаментальной науки, со всеми вытекающими отсюда последствиями, одно из которых социологи науки уже констатировали: потеря российской наукой лидирующих мест во многих отраслях.

Без каких-либо общественных дискуссий о путях и формах реформирования высшего образования власти РФ реализуют широкомасштабные мероприятия по установлению менеджериальной модели образования и академического контракта, основанного на внешнем оценивании преподавателей. Этот «эффективный контракт» не является результатом переговоров вуза и преподавателя, а устанавливается административно-бюрократическими процедурами. В вузах происходит свертывание академических свобод и увеличивается роль бюрократии и менеджмента, который выводится из-под контроля профессионального сообщества.

Реформаторам образования и науки необходимо учитывать последствия разрушения системы образования в стране, снижения доступности основной части молодежи к высшему образованию. Реформа приводит к изменению социальной структуры общества, к росту пропасти между богатыми и бедными, к росту социальной напряженности в стране.

Литература

1. *Андреев А.А.* О модернизации образования в России. Историко-социологический анализ // Социол. иссл-я. 2011. № 9. — С. 111–120.
2. *Добренькова Е.Н.* Проблемы вхождения России в Болонский процесс // Социол. иссл-я. 2007. № 6. — С. 94–106.
3. *Душина С.А., Хватова Т.Ю., Николаенко Г.А.* Институциональные изменения в исследовательских университетах: проблема легитимации // Социология науки и технологий. 2015. Т. 6. № 3. — С. 9–28.
4. *Иванова В.И., Матвеева Н., Осипов А.М., Рысакова П.И.* Современная социология образования в России: некоторые итоги и проблемы развития // Социол. иссл-я. 2013. № 5.
5. *Кугель С.А., Блок М., Хватова Т.Ю.* К вопросу о применении бизнес-модели в сфере высшего образования // Социол. иссл-я. 2014. № 10. — С. 106–116.

6. *Курбатова М.В., Каган Е.С., Апарина Н.Ф.* Поведение работников вузов в условиях реформирования высшего профессионального образования: проблема выбора // Социол. иссл-я. 2015. № 2. — С. 122–133.
7. *Лазар М.Г.* Вхождение России в Болонский процесс: мечты и реальность // Учен. зап. РГГМУ. 2009. № 9. — С. 190–203.
8. *Лазар М.Г.* Воздействие реформы высшего образования на будущие кадры науки // Социология науки и технологий. 2015. Т. 6. № 1. — С. 47–57.
9. *Марвин С.В.* Нормированная долевая цитируемость как универсальная характеристика научной публикации // Социология науки и технологий. 2016. Т. 7. № 1. — С. 95–108.
10. *Михайлов О.В.* РИНЦ: первые 10 лет развития // Социология науки и технологий. 2016. Т. 7. № 1. — С. 86–94.
11. *Сорокина Н.Д.* О компетентностном подходе и проективном обучении (на примере курса «Конфликтология» // Социол. иссл-я. 2010. № 5. — С. 123–128.
12. *Смолин О.Н.* Высшее образование: борьба за качество, или Покушение на человеческий потенциал? // Социол. иссл-я. 2015. № 6. — С. 91–101.
13. *Тавокин Е.П.* Российское образование под прицелом «реформ» // Социол. иссл-я. 2012. № 8. — С. 134–143.
14. *Шаронова С.А.* Компетентностный подход и стандарты в образовании (сравнительный анализ ЕС и России) // Социол. иссл-я. 2008. № 1.
15. *Чеботарев П.Ю.* Наукометрия: как с ее помощью лечить, а не калечить? // Управление большими системами. 2013. Т. 44. — С. 14–31.
16. *Федеральный* закон от 29.12.2012 г. № 273 «Об образовании в Российской Федерации».
17. *Marginson S.* Academic creativity under new public management: foundation for an investigation // Educational Theory, 2008, vol. 58, iss. 3, p. 269–287. — DOI:10.1111/j.1741-5446.2008.00288.x.

М.А. Трубина, Я.В. Скорик, Е.К. Семова, И.В. Цейтлин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДАПТАЦИИ ИНОГОРОДНИХ СТУДЕНТОВ К ВУЗОВСКОМУ ОБУЧЕНИЮ

M.A. Trubina, Y.V. Scoryk, E.K. Semova, I.V. Tseitlin

STUDY OF ADAPTATION FOR NONRESIDENT STUDENTS OF HIGH SCHOOL TRAINING

Адаптация студентов к вузовскому обучению — сложный биосоциальный процесс, от успешности которого зависит самочувствие и качество жизни студентов, освоение учебной программы, уровень компетенции, а значит, и уровень профессиональной подготовки будущего специалиста. Более половины студентов, обучающихся в вузах Санкт-Петербурга, приходится на иногородних студентов. Поступив в вуз, молодые люди оказываются в новых условиях (социальных, бытовых, экологических и климатических). В статье представлены результаты комплексного исследования влияния природных и социальных факторов на адаптацию иногородних студентов в условиях мегаполиса. В статье рассмотрены основные проблемы адаптации студентов к вузовскому обучению. Описана авторская технология оценки индивидуальной гелиометеочувствительности человека для комплексной оценки адаптации иногородних и иностранных студентов.

Ключевые слова: социальная адаптация, иногородние/иностранные студенты, акклиматизация, дидактическая адаптация.

Adaptation is difficult social and biological process on which the health and quality of life of students, development of the training program and quality of education depends. Majority students of St. Petersburg arrived to study from various cities of Russia and other countries. However, having entered to the university, young people have to adapt for new conditions (social, household, ecological and climatic). In article there are results of complex research of influence of natural and social factors on adaptation of nonresident students in the conditions of the megalopolis.

Keywords: social adaptation, nonresident and foreign students, acclimatization, didactic adaptation.

Введение

В современном информационном обществе получение высшего профессионального образования является стратегической задачей развития его интеллектуального потенциала. Введение новых правил поступления в вузы по результатам ЕГЭ усилило желание молодежи обучаться в крупных городах — мегаполисах, имеющих престижные вузы. Однако поступив в вуз, иногородние студенты оказываются в новых условиях, адаптация к которым является сложным социально-биологическим процессом.

По данным ЮНЕСКО, Россия занимает восьмое место в мире по количеству иностранных студентов [1]. Доля России на мировом рынке высшего профессионального

образования составляет 3,8 % [2]. Наибольшее количество иностранных студентов приезжает из стран содружества независимых государств (79 %), Азии (15 %), Ближнего Востока и Африки (4 %) [3].

Санкт-Петербург является одним из крупнейших научно-культурных центров России. Более половины студентов, обучающихся в вузах города, приходится на молодых людей, приехавших из разных городов России и стран мира. И поступив в вуз, иногородние студенты оказываются в новых условиях (социальных, бытовых, экологических и климатических), адаптация к которым является сложным индивидуальным процессом.

Механизмы адаптации человека имеют разнонаправленный характер. Так, обычно выделяют три типа адаптации — биологическую, социально-психологическую и этническую (особый вид адаптации). Основные трудности привыкания приезжих студентов связывают с проживанием в новых социокультурных и бытовых условиях. Адаптация к климатическим и экологическим условиям также вызывает напряжение адаптационно-приспособительных механизмов личности, что проявляется в ухудшении самочувствия, повышении степени гелиометеочувствительности, снижении защитного потенциала организма студентов.

Процесс адаптации к учебному процессу у иногородних студентов представляет собой сложный, многоуровневый социально-психологический процесс и сопровождается значительным напряжением компенсаторно-приспособительных систем организма [4]. Педагоги, социологи и психологи, которые занимаются данной проблематикой, выделяют дополнительный вид адаптации, характерный только для учащихся, — *дидактическую адаптацию*, которая представляет собой подготовку студентов к новым формам и методам учебно-воспитательной работы образовательного учреждения. Сложности дидактической адаптации обусловлены чрезмерными умственными нагрузками, большим объемом самостоятельной работы, неумением организовать свое время и т.д.

Результаты исследований ряда авторов [5, 6, 10] показали, что студенты привыкают к обучению только к концу третьего курса, а большинство из них начинают первый учебный год в состоянии психофизиологического напряжения и стресса. Трудности адаптации обусловливают развитие психосоматических патологий, которые проявляются в нарушении функционирования желудочно-кишечного тракта, кожных заболеваниях (аллергия, нейродермит и др.), сердечно-сосудистых заболеваниях, стоматологических, а также бронхолегочных заболеваний.

Таким образом, от успешности процесса адаптации зависит самочувствие и качество жизни студентов, освоение учебной программы, а значит, уровень компетенции и качество профессиональной подготовки будущего специалиста. Адаптация иногородних студентов является серьезной проблемой, решение которой требует комплексного (междисциплинарного) подхода.

Целью настоящей работы является комплексная оценка влияния факторов природной и социальной среды на процессы адаптации иногородних студентов (на примере Санкт-Петербурга) на основе использования новейших технологий.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи.

1. Изучение климатических и биоклиматических особенностей стран мира, Северо-Западного региона, включая Санкт-Петербург, и рассмотрение особенностей влияния климата на организм человека.

2. Анализ особенности процессов адаптации и акклиматизации иногородних студентов.
3. Проведение экспериментального исследования (биометеорологический мониторинг) по адаптации иногородних студентов в Санкт-Петербурге.
4. Испытание авторской модели исследования и технологий оценки индивидуальной гелиометеочувствительности человека для комплексной оценки адаптации иногородних студентов РГГМУ.

Процесс адаптации иностранных студентов имеет более выраженный характер, чем у иногородних студентов из России. Адаптация к климатическим и экологическим условиям вызывает напряжение адаптационно-приспособительных механизмов, что проявляется в ухудшении самочувствия, повышении степени гелиометеочувствительности и снижении защитного потенциала организма студентов.

Новизна настоящей работы заключается в том, что впервые применяется комплексный подход к изучению проблем адаптации/акклиматизации иногородних студентов в условиях Северо-Западного региона (на примере Санкт-Петербурга).

Материалы и методы

Исследование проведено на базе Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) в период с 2012 по 2015 годы. Сформировано три группы студентов-волонтеров: студенты-петербуржцы (контрольная группа) и две исследовательские группы — иногородние и иностранные студенты.

Субъективные методы. Комплексное социологическое исследование состоит из пяти информационных блоков и проведено на основе авторских анкет «Образ жизни студентов» и «Адаптация иностранных студентов». Информационные блоки социологического исследования представлены на рис. 1.

Рис. 1. Информационные блоки комплексного социологического исследования

Степень индивидуальной гелиометеочувствительности определена по методикам «Метеотест» (Григорьев И.И., 2000) и «биометеорологический портрет» (Трубина М.А., 2005) [7, 8]. Анкетирование проведено в сети Интернет в приложении Google Drive.

Объективные методы включает в себя проведение скрининговых исследований с использованием новейшего оборудования АПК «ОМЕГА-Медицина», оценку адаптационного потенциала на основе физиологических индексов, а также биометеорологический мониторинг: формирование базы данных метеорологических, гелиогеофизических и экологических параметров, расчет биометеорологических индексов [9].

Акклиматизационная нагрузка на организм студентов определена по методике расчета интегрального показателя нагрузки (ИПН) (Матюхин В.А., 1988).

Обсуждение результатов

Приведем лишь некоторые из полученных результатов исследования.

География распределения студентов РГГМУ. По данным приемной комиссии РГГМУ за период с 2003 по 2015 г. определена география распределения иностранных студентов. Большинство студентов приезжает из Туркменистана (27 %), Китайской народной республики (7 %) и Монголии. Большинство иногородних студентов приезжает из Республики Саха (7 %), Республики Коми, Курганской и Мурманской областей (4 %). География распределения иностранных студентов РГГМУ представлена на рис. 2.

Оценка акклиматизации студентов в условиях Санкт-Петербурга. Студенты, приезжающие в Санкт-Петербург из регионов экваториального, субэкваториального, тропического и субтропического климатического пояса, вынуждены адаптироваться к холодной зиме (средняя температура самого холодного месяца составляет –5,8 °С), высокой относительной влажности воздуха (более 70 %), частой смене погоды. Такие особенности физико-географического положения местности, как дефицит ультрафиолета, явление белых ночей летом, короткий световой день в зимний период и т.д., являются причиной нарушения привычного биологического ритма организма студентов.

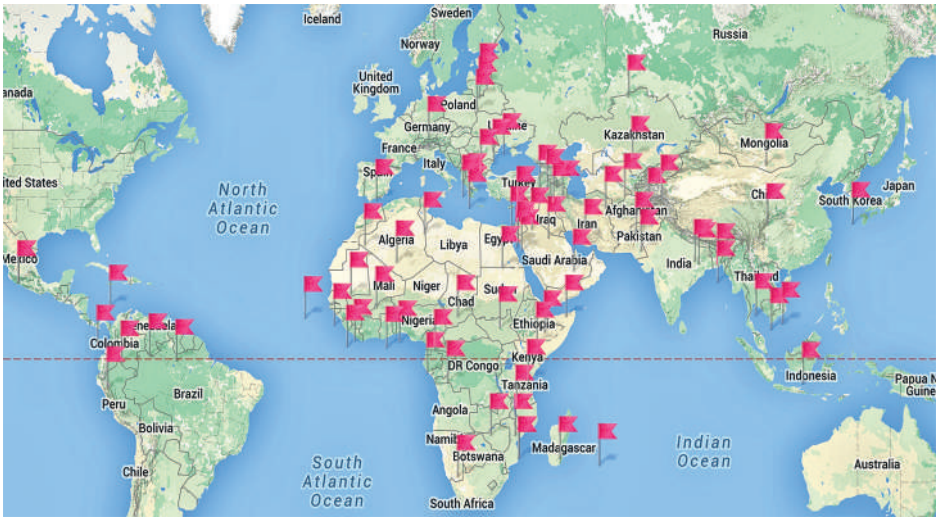


Рис. 2. География распределения иностранных студентов РГГМУ
(по данным приемной комиссии 2003–2015 гг.)

Кроме того, для студентов, приехавших из более теплой и сухой климатической зоны, существует риск переохлаждений и возникновения холодовых аллергий в зимний период. Студенты, приехавшие из субарктического климатического пояса, испытывают

перегревание в летний период, у них возможны частые простуды и ОРВИ. В свою очередь студенты, приезжающие из республики Саха (Якутия), в Северо-Западном регионе оказываются в более комфортных климатических условиях, поэтому климат Санкт-Петербурга может способствовать их оздоровлению.

Для исследования *индивидуальных особенностей акклиматизации* студентов проведен медико-биологический эксперимент и биометеорологический мониторинг с использованием объективных методов, в результате чего были получены архивы многофакторной информации, включающие следующие информационные блоки:

– медицинская информация о состоянии здоровья студентов;
– гелиогеофизическая информация;
– экологическая информация.

В скрининговом исследовании процесса адаптации приняли участие 150 студентов в возрасте 17–25 лет (т. н. группа роста), в том числе: юношей — 54 %, девушек — 46 %. По результатам метеотеста оказалось, что более половины группы студентов отмечают изменение самочувствия при изменении погоды.

Как видно из рис. 3, большинство студентов всех групп имеют низкий уровень метеочувствительности. При этом оказалось, что средний и высокий уровни метеочувствительности имеют: 20 % — студентов-петербуржцев, 13 % — иностранных студентов и только незначительная часть (4 %) — иногородние студенты. Повышенная метеочувствительность студентов может быть связана с образом жизни и состоянием здоровья молодых людей.

При субъективной оценке выявлено, что наибольшее влияние на самочувствие студентов оказывают такие природные явления, как дождь, морось, ураганный ветер, жара, духота, а также перепады температур.

	Студенты-петербуржцы	Иногородние студенты	Иностранные студенты
Низкий	80%	96%	87%
Средний	13%	2%	10%
Высокий	7%	2%	3%

Рис. 3. Уровень метеочувствительности студентов

Проведенные скрининговые исследования функционального состояния на основе «ОМЕГА-Медицина» показали, что у 62 % иногородних студентов отличное функциональное состояние организма (79 % < Н < 80 %), а у 38 % — хорошее (80 % < Н < 100 %).

Образ жизни студентов. Исследование образа жизни студентов показало, что иностранные студенты ведут более здоровый образ жизни, чем петербуржцы и иногородние студенты. Как видно из рис. 4, большинство иностранцев (60 %) соблюдают режим сна, занимаются различными видами спорта, фитнесом или только делают зарядку (56 %). Также в группе иностранных студентов выявлено наименьшее количество курящих студентов (4 %). По сравнению с российскими студентами иностранцы более внимательно относятся к своему здоровью, интересуются методами изучения и профилактики возможных недомоганий и заболеваний, а также возможными и способами укрепления своего здоровья.

		Студенты-петербуржцы	Иногородние студенты	Иностранные студенты
Продолжительность сна	более 8 ч/сут.	34 %	29 %	60 %
	8 ч/сут.	34 %	39 %	25 %
	менее 8 ч/сут.	32 %	31 %	15 %
Занятие спортом		50 %	47 %	56 %
Наличие вредных привычек (курение)		32 %	24 %	4 %

Рис. 4. Образ жизни студентов

Студенческая жизнь характеризуется такими стресс-факторами, как чрезмерные умственные нагрузки, гиподинамия, нарушение режима сна и отдыха, поэтому студенты часто жалуются на боль в спине и суставах, слабость. Ухудшение самочувствия иностранных студентов (головная боль, сонливость, утомляемость) связано с акклиматизацией, употреблением непривычных продуктов питания, сменой образа жизни.

Оценка социальной адаптации иностранных студентов. По результатам анкетирования и интервьюирования основные трудности у иногородних и иностранных студентов вызваны социальной адаптацией и привыканием к учебному процессу. Важную роль в ходе социальной адаптации иностранных студентов, особенно ее социокультурной составляющей, выполняют *агенты адаптации*:

– сотрудники Центра международного образования вуза;
– преподаватели, в том числе кураторы студенческих групп;
– одногруппники;
– студенческий совет;
– представители землячеств.

Они помогают студентам овладевать ситуацией, то есть предоставляют необходимую информацию, помогают в освоении новых социальных ролей, налаживании социальных контактов и т.д. Некоторые результаты анкетирования иностранных студентов представлены на рис. 5, 6, 7.

Благодаря проведенному опросу «Адаптация иностранных студентов» было выявлено, что наиболее существенную помощь и поддержку в процессе приспособления к жизни в России иностранные студенты получают от преподавателей (38 %), земляков (20 %), соседей по общежитию (17 %), и одногруппников (14 %). Иностранные студенты хотят, чтобы их привлекали к участию в мероприятиях (37 %), ждут помощи в обучении (26 %), улучшении жилищных условий в общежитии (25 %) и наличия наставников (10 %).

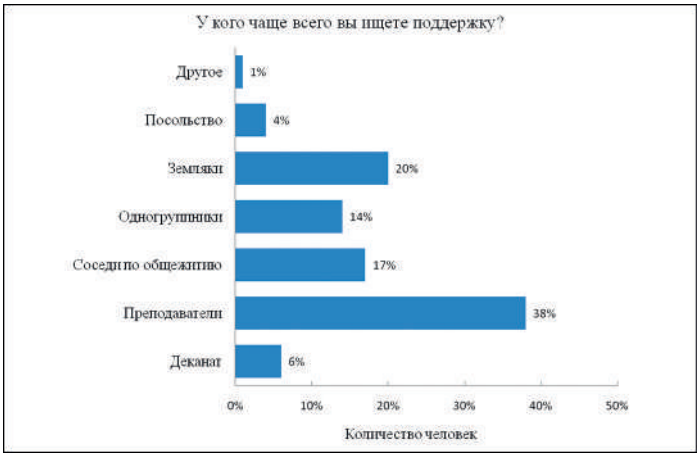


Рис. 5. Результаты опроса «Адаптация иностранных студентов к условиям мегаполиса»

Рис. 6. Результаты опроса «Адаптация иностранных студентов к условиям мегаполиса»

Рис. 7. Результаты опроса «Адаптация иностранных студентов к условиям мегаполиса»

Оценка дидактической адаптации студентов. Важнейшим условием адаптации иностранных студентов к новой образовательной среде является организация активного взаимодействия между преподавателями и студентами, что требует проведения внеаудиторных мероприятий, способствующих формированию речевых и социокультурных компетенций. Особое внимание стоит уделить внедрению инновационных педагогических методов обучения в условиях болонского процесса — элементов электронного обучения (вебинаров, чатов, электронных обучающих материалов, взаимодействие в социальных сетях и т.д.).

У большинства иностранных студентов существуют проблемы в освоении русского языка. Так, иностранные студенты считают свой уровень владения русским языком достаточным для повседневного общения, но недостаточным для учебного процесса (18 %). По причине языкового барьера иностранные студенты недостаточно информированы о возможностях получения помощи (медицинской, правовой и т.д.), возможностях участия в различных мероприятиях (культурных, спортивных, научно-практических), что осложняет процесс адаптации. Социальная адаптация иногородних студентов в основном вызвана проблемами ориентирования в большом городе и особенностями бытовых условий общежития. Важной проблемой адаптации иностранных студентов является непривычный для их организма рацион питания.

Социальное значение исследования

Можно отметить большой интерес у студентов-волонтеров к теме данного исследования, так как оно направлено на улучшение качества жизни студенчества в вузе. Проведенное исследование выявило проблемы и особенности адаптации среди иностранных студентов. Авторами был разработан инициативный проект «Адаптация», направленный на создание в РГГМУ благоприятных условий для лучшего привыкания иностранных студентов к жизни и учебе в России, формирования поликультурной среды, атмосферы единства, дружбы, сотрудничества и творчества, подлинного гостеприимства.

Следует отметить значение специального мероприятия «Люди мира», проводимого как на базе РГГМУ, так и в Санкт-Петербурге, объединяющее международное студенчество на принципах толерантности.

Выводы

Абсолютное большинство иногородних и иностранных студентов сталкивается с множеством трудностей как физиологического, так и социально-психологического характера. В основном трудности вызывает социальная адаптация. И одним из главных факторов, дезадаптации является недостаток информации по различным жизненно важным вопросам (правовым, бытовым, вопросам, касающимся получения медицинской помощи и т.д.).

Акклиматизация иногородних студентов в основном связана с нарушением привычного режима суточного биоритмологического графика жизнедеятельности организма вследствие смены часового пояса, биоклиматических условий.

Разработка программы мероприятий по адаптации иногородних студентов к образовательной среде вуза должна быть основана на комплексном подходе с применением инновационных педагогических, информационных и телекоммуникационных технологий. Планируется создание межвузовского центра поддержки иногородних и иностранных студентов, привлечение в проект представителей администрации, специалистов и экспертов различных областей знаний (врачей, психологов, социологов, юристов), проведение тематических семинаров, вебинаров, консультаций.

Особое внимание необходимо уделить развитию социальной среды вуза, способствующей дидактической адаптации иногородних студентов, включающей комфортные условия проживания, организацию питания, включающего блюда национальной кухни.

Заключение

Современная модернизация системы образования, внедрение новых педагогических и информационных технологий, увеличение учебной нагрузки, — все это создает дополнительное напряжение адаптационно-приспособительных механизмов организма студентов.

Проблема адаптации иностранных студентов к условиям обучения и проживания в нашей стране является актуальной и стратегически важной задачей, поэтому она требует нетривиальных решений от руководства вуза и общественных студенческих организаций для создания благоприятных условий смягчения адаптации и акклиматизации иностранных студентов в условиях мегаполиса.

Большинство нервно-психических и психосоматических расстройств, которые возникают у студентов, являются результатом нарушения их привыкания к учебному процессу. Основные трудности приезжих студентов более всего связаны с проживанием в новых социокультурных и бытовых условиях, изменением питания. Адаптация к климатическим и экологическим условиям вызывает напряжение адаптационно-приспособительных механизмов, что проявляется в ухудшении самочувствия, повышении степени гелиометеочувствительности, снижении адаптационного потенциала организма студентов.

Выражаем благодарность студентам-волонтерам, принявшим участие в проведении экспериментов, коллективу кафедры русского языка и управлению дополнительного образования, приема и трудоустройства студентов РГГМУ.

Приглашаем к сотрудничеству всех заинтересованных коллег!

Литература

1. *Шереги Ф., Дмитриев Н., Арефьев А.* Россия на мировом рынке образовательных услуг [Электронный ресурс] // Центр стратегических исследований Приволжского федерального округа: Государство и антропоток. — URL: http://www.antropotok.archipelag.ru/text/ad12.htm (дата обращения: 15.07.2015).
2. *Андреев А.Л.* Россия в глобальном образовательном пространстве [Электронный ресурс] // Интелросс. Интеллектуальная Россия. — URL: http://www.intelros.ru/intelros/reiting/reyting_09/material_sofiy/8488-rossiya-v-globalnom-obrazovatelnom-prostranstve.html (дата обращения: 15.04.2015).
3. *Российский* статистический ежегодник — 2013 г. Раздел высшее образование студенты из СНГ [Электронный ресурс]. — URL: http://www.gks.ru/bgd/regl/b13_13/IssWWW.exe/Stg/d1/07-56.htm (дата обращения: 06.06.2014).

4. *Кутейников А.Н., Огарева Е.И.* Ценностные ориентации студентов как фактор адаптации студентов к учебному процессу в вузе [Электронный ресурс] // Фундаментальные исследования. 2014. № 8–4. — URL: http://cyberleninka.ru/article/n/tsennostnye-orientatsii-studentov-kak-faktor-adaptatsii-studentov-k-uchebnomu-protsessu-v-vuze (дата обращения: 30.09.2015).
5. *Глебов В.В., Михайличенко К.Ю., Чижов А.Я.* Психофизиологическая адаптация популяции человека к условиям мегаполиса. — М.: Рос. Ун-т дружбы народов, 2013. — 325 с.
6. *Данияров С.Б. и др.* Взаимосвязь физиологических и психологических показателей в процессе адаптации у студентов / С.Б. Данияров, В.В. Соложенкин, И.Г. Краснов // Психол. ж. 2011. Т. 10. № 1. — С. 98.
7. *Трубина М.А., Семова Е.В.* Междисциплинарные исследования процесса адаптации иногородних студентов к условиям мегаполиса (на примере Санкт-Петербурга) // Космос и биосфера: тезисы докладов X Международной крымской конференции. — Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2013. — С. 273–275.
8. *Scoryk Y., Semova E., Trubina M.* Complex approaches to the study of type's adaptation of nonresident students to conditions of the metropolis (St. Petersburg) // IGU 2015 Book of Abstracts, 2015, p. 553.
9. *Трубина М.А., Семова Е.В., Скорик Я.В., Цейтлин И.В.* Исследование влияния факторов природной и социальной среды на процессы адаптации // Научные труды конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине». — СПб.: Оккервиль, 2015. — С. 202–203.
10. *Ромм М.В.* Адаптация личности в социуме: теоретико-методологический аспект. — Новосибирск, 2002. — С. 64–65.

ХРОНИКА

Последнее в весеннем семестре 2016 г. заседание кафедры Экологии было выездным. Сотрудники кафедры на катере «Летиция» были доставлены профессором Дмитрием Германовичем Семеновым на о. Мазаевский, расположенный в устье Малой Невки у Петровского моста. Здесь состоялось подведение итогов работы кафедры за 2015/2016 учебный год и обсуждение планов на 2016–2017 гг. Ранее проф. Д.Г. Семенов был награжден Почетной грамотой Санкт-Петербургского городского отделения Русского Географического общества за организацию очистки от мусора этого островка, являющегося местом постоянного гнездования кряковых уток и чаек.

* * *

21 июня в Представительстве Ямало-Ненецкого автономного округа в Санкт-Петербурге губернатор ЯНАО Д.Н. Кобылкин вручил медаль «За сохранение Арктики» профессору кафедры «Устойчивое развитие полярных областей» РГГМУ Вячеславу Михайловичу Макееву за многолетние плодотворные научные исследования природной среды Арктики и оценку ее изменений, вызванных природными и антропогенными факторами, разработку рекомендаций по ее защите и восстановлению.

* * *

С 20 по 30 июня в г. Нефтеюганске (Ханты-Мансийский автономный округ) состоялся Форум молодежи Уральского федерального округа «Утро – 2016», в работе которого принимали участие 1500 человек. В рамках форума работали 12 секций или тематических смен. В работе секции «Урал Арктический» участвовал представитель РГГМУ, заведующий кафедрой «Устойчивое развитие полярных областей» профессор Макеев Вячеслав Михайлович, приглашенный на форум межрегиональной общественной экологической организацией «Зеленая Арктика». Основная цель работы секции-содействие раскрытию потенциала рабочей молодежи Российской Федерации и стран ближнего зарубежья для реализации стратегических планов развития Российской Арктики, экологически безопасного и экономически эффективного освоения ее ресурсов, повышения качества жизни и комфортности проживания населения арктических территорий. По просьбе организаторов форума В.М. Макеев выступил с докладом «Арктика: прошлое и настоящее».

* * *

В период **с 24 июня по 14 июля** состоялась стажировка в Университете Фридриха Шиллера г. Йена (Германия) сотрудников РГГМУ — профессора М.Б. Шилина

и доцента В.М. Абрамова по программе ЭРАЗМУС ПЛЮС. Партнерами российских ученых с немецкой стороны были профессора Уве Хоссфельд, Георгий Левит, Кристиана Шмуллиус, доктор Томас Бах и доктор Марсель Урбан. В ходе стажировки обсуждена возможность написания совместных научных статей и учебно-методических пособий. В.М. Абрамов совместно с д-ром М. Урбаном подготовили доклад, включенный в программу Конференции EMECS'11 — Морские берега XXVI «Управление рисками в прибрежной зоне в условиях меняющегося мира». Тезисы доклада опубликованы в Материалах Конференции. Встреча М.Б. Шилина и В.М. Абрамова со студентками РГГМУ А. Семионовой и О. Гильдеевой, обучающимися в университете г. Йена в течение двух семестров, было подтверждено, что девушки успешно справляются с насыщенной учебной программой и демонстрируют хорошую общенаучную и профессиональную подготовку.

* * *

16—17 июля профессора РГГМУ В.И. Сычев и М.Б. Шилин сделали презентационные сообщения на XXX Маклаевских чтениях, посвященных 170-летию со дня рождения Н.Н. Миклухо-Маклая. Чтения проходили в г. Окуловка и в родовой усадьбе Миклухо-Маклая Языково-Рождественское (Новгородская область). Доклад В.И. Сычева был посвящен раннему этапу научной карьеры Миклухо-Маклая, связанному с увлечением океанографией. В докладе М.Б. Шилина, подготовленном по материалам стажировки в университете г. Йена, была освещена тема взаимодействия Миклухо-Маклая с его научным руководителем и учителем Эрнстом Геккелем. И учитель, и ученик внесли значительный вклад в становление экологии человека, хотя их научные взгляды существенно различались.

* * *

22—27 августа РГГМУ при партнерстве с Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Всероссийским научно-исследовательским геологическим институтом им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ) провел совместную Конференцию EMECS'11 — Морские берега XXVI «Управление рисками в прибрежной зоне в условиях меняющегося мира». Санкт-Петербург принял около 400 участников конференции из более чем 30 стран мира, среди которых: России, Япония, Индия, Китай, Таиланд, Бразилия, Колумбия, США, страны Ближнего Востока, Африки и Европы. Конференция проводилась на трех площадках Санкт-Петербурга: AZIMUT Отель Санкт-Петербург, РГГМУ и ВСЕГЕИ (молодежная сессия). В торжественном открытии Конференции 23 августа участвовали представители администрации Санкт-Петербурга (И.А. Серебрицкий, заместитель председателя Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Администрации Санкт-Петербурга) и префектуры Хего, Япония (К. Канадзава, вице-губернатор), руководитель международного центра EMECS М. Ватанабе, председатель Рабочей группы «Морские берега» Совета по изучению Мирового океана РАН Л.А. Жиндарев, руководители и представители институтов-организаторов конференции — и.о. ректора РГГМУ В.Л. Михеев,

Д.В. Рябчук (ВСЕГЕИ) и Р.Д. Косьян (Южное отделение ИО РАН). Письменное приветствие от лица Министра образования и науки Российской Федерации было зачитано исполнительным директором Оргкомитета конференции Г.Г. Гогоберидзе. В работе конференции приняла участие официальная делегация Правительства и Парламента префектуры Хего, Япония, во главе с вице-губернатором префектуры Кадзуо Канадзава. Насыщенная научная программа Конференции включала 246 докладов (130 устных и 116 стендовых), представленных участниками в рамках тематических секционных заседаний в течение четырех дней, и охватывала широкий круг вопросов комплексного управления прибрежными зонами замкнутых морей. В рамках Конференции была проведена специализированная сессия стран БРИКС, совмещенная со второй встречей официальных лиц стран БРИКС по приоритетному направлению «Предотвращение и уменьшение последствий от природных катастроф». Представители всех пяти стран БРИКС (что произошло впервые!) приехали в Петербург, чтобы совместно рассмотреть текущее состояние по приоритетному направлению для каждой из стран БРИКС, с учетом географического расположения стран и разнообразия вопросов по предупреждению и ликвидации природных катастроф, и обсудить возможности совместной деятельности и разработки совместных научно-технологических продуктов. Особого внимания требует организованная в рамках Конференции молодежная сессия (Students and Schools Partnership Session — SSP), в которой приняли участие 11 учащихся старших классов и первых курсов вузов России, Японии и США с целью выработки своего видения проблем устойчивого развития прибрежных регионов мира. В результате насыщенной и плодотворной работы ученых из разных стран мира по итогам Конференции была принята Декларация конференции, в которой было особо отмечена необходимость более плотного совместного сотрудничества и взаимодействия между учеными и обществом с целью увеличения эффективности управления морскими экосистемами.

ДАНИИЛ ЛЬВОВИЧ СОКОЛОВСКИЙ (1896–1986)

(К 120-летию со дня рождения)

Даниил Львович Соколовский — один из крупнейших российских специалистов-гидрологов, основоположник учения о речном стоке, новатор в области гидрологических и водохозяйственных расчетов, родился 9/22 августа 1896 года в селе Береза Барановичского района Белоруссии. После окончания Харьковского сельскохозяйственного института начал свою трудовую деятельность в качестве инженера-мелиоратора.

С 1926 года Даниил Львович работал в речном отделе Государственного Гидрологического института, где занимался вопросами формирования речного стока и гидрологических расчетов. Совершенствованию методов расчетов речного стока Даниил Львович уделил большое внимание, перейдя в 1929 году на работу по совместительству в институт Гидроэнергопроект. Именно здесь он возглавил группу гидрологических расчетов и впервые в нашей стране обосновал и применил кривые распределения для гидрологических и водохозяйственных расчетов при проектировании гидротехнических сооружений. Результаты этих разработок были изложены в монографии, опубликованной в 1930 году, «Применение кривых распределения к установлению вероятных колебаний годового стока рек Европейской части СССР». Уже в 1932 году разработанная методика была внедрена в практику расчетов во всесоюзном масштабе, а Даниил Львович Соколовский возглавил все исследования по речному стоку в нашей стране.

Научная деятельность Даниила Львовича в этот период в Государственном Гидрологическом институте была исключительно многогранной и связана, с одной стороны, с развитием применения методов теории вероятности и математической статистики в гидрологии, с другой стороны, им рассматривались вопросы генезиса речного стока. Результатом исследований явились многочисленные научные публикации, среди которых «Применение кривых вероятностей и расчеты годового и максимального стока» (1934), «Связь стока с осадками в различных географических условиях»

(1936), «Приближенная формула расчета максимального стока ливневых вод» (1937) и др. Неоднократно Даниил Львович выступал с докладами на престижных научных конференциях, например на 4-й гидрологической конференции Балтийских стран с генеральным докладом «О водном балансе Балтийского моря» (1933).

Одним из главных достижений Даниила Львовича за этот период явилась монография «Нормы максимального стока весенних паводков рек СССР» (1937). Этот выдающийся труд вместе с его другими известными работами в этой области позволил Высшей аттестационной комиссии присудить Даниилу Львовичу Соколовскому ученую степень доктора технических наук и звание профессора без защиты диссертации. Работы Даниила Львовича в этот предвоенный период выдвинули его в число крупнейших специалистов-гидрологов нашей страны. Его известные формулы расчета максимального стока и упомянутые выше кривые распределения и обеспеченности, оценка их параметров вошли в государственные стандарты и до настоящего времени широко используются в практике гидрологических расчетов. Примером могут служить прикладные работы Д.Л. Соколовского по водоснабжению крупнейшего промышленного комплекса и связанных с ним населенных пунктов Восточного Урала.

Эти исключительно важные работы продолжались и во время войны. Так, в 1943 году вышла его очередная книга «Водные ресурсы рек промышленного Урала», за которую Даниил Львович Соколовский был удостоен Государственной премии.

В 1946 году Даниила Львовича пригласили в Ленинградский Гидрометеорологический институт на должность заведующего кафедрой инженерной гидрологии. В этот период наряду с продолжением научных исследований он успешно занимался и учебно-методической деятельностью. Его научные интересы по-прежнему охватывали области формирования и расчетов речного стока, согласуясь с известными правительственными постановлениями по охране природы и развитию народного хозяйства. Так, в 1946 году им была опубликована капитальная работа «Гидрологические и водохозяйственные расчеты при проектировании малых ГЭС», в которой в равной мере были представлены теоретические разработки и прикладные выводы.

В 1952 году вышла книга «Речной сток», в которой были обобщены как личные исследования Даниила Львовича в этой области, так и достижения советской и зарубежной науки. Содержание книги явилось основой для разработки профилирующего учебного курса «Речной сток и гидрологические расчеты», который Д.Л. Соколовский много лет блестяще читал в ЛГМИ. Книга «Речной сток» (основы теории и методики расчетов) была переиздана в 1959, 1968 годах и явилась образцом учебника для высшей школы. Этот учебник отличают глубокое теоретическое рассмотрение процессов формирования стока и практические рекомендации по применению географических, физико-математических и статистических методов к расчетам речного стока.

Лекции профессора Д.Л. Соколовского отличались четкостью, строгой последовательностью изложения материала, стремлением сочетать теорию с практическими выходами. При этом он всегда уделял большое внимание уровню практических, лабораторных занятий и курсовых проектов. Содержание дипломных проектов, как правило, открывало простор самостоятельной активности студентов. К заслугам Даниила Львовича следует отнести организацию производственных практик студентов с их практической деятельностью на производстве, в том числе в экспедициях.

Экспедиционные работы, организованные по инициативе Даниила Львовича, служили не только местом практик студентов, но и местом выполнения научных исследований кафедры по вопросам формирования и расчетов речного стока. Такие исследования проводились на Камчатке, Сахалине, Дальнем Востоке, Алтае, в Заволжье и других районах страны.

Одной из существенных сторон педагогической деятельности Даниила Львовича всегда была подготовка специалистов высшей квалификации через аспирантуру и докторантуру. Всего он подготовил более 50 кандидатов и докторов наук. Его ученики и ученики его учеников занимали и занимают видные места в иерархии специалистов-гидрологов. Даниил Львович Соколовский оставил о себе память как выдающийся ученый и педагог, внесший неоценимый вклад в развитие науки инженерной гидрологии.

А.М. Догановский

Список авторов

Алексеева Екатерина Геннадьевна, ученый секретарь Ученого совета РГГМУ, E.Alekseeva@rshu.ru
Барышников Николай Борисович, д-р геогр. наук, проф., каф. гидрометрии РГГМУ, kafedra_gm@rshu.ru
Боков Виктор Николаевич, канд. геогр. наук, доц. каф. метеорологических прогнозов, РГГМУ, dekanat_mf@rshu.ru
Бонгу Сотима Эрнесто, аспирант каф. гидрофизики и гидропрогнозов, ernesott@mail.ru
Виноградов Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., ООО «Научно-производственное объединение "Гидротехпроект"», gtp.vinogradov.au@yandex.ru
Войнов Геннадий Николаевич, д-р геогр. наук, зав. лаб. «Приливные явления», ФГБУ ГОИН им. Н.Н. Зубова, СПб отделение, voinovgn@mail.ru
Воробьев Владимир Николаевич, советник ректора РГГМУ, канд. геогр. наук, проф., vnv@rshu.ru
Воропаева Ирина Дмитриевна, магистрант океанологического факультета РГГМУ, ira-958@mail.ru
Гаврилов Илья Сергеевич, ст. преподаватель, каф. гидрометрии, РГГМУ, ilia20091@mail.ru
Гайдукова Екатерина Владимировна, канд. техн. наук, доц. каф. гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ, oderiut@mail.ru
Галин Венер Ягафарович, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., Институт вычислительной математики РАН, galin@inm.ras.ru
Голубкин Павел Андреевич, мл. науч. сотр., лаб. спутниковой океанографии РГГМУ, pgolubkin@rshu.ru
Гордеева Светлана Михайловна, канд. геогр. наук, доц. каф. ПО и ОПВ, РГГМУ, gordeeva@rshu.ru
Джалалванд Али, аспирант каф. гидрофизики и гидропрогнозов, a.jalalvand@gmail.com
Догановский Аркадий Михайлович, д-р геогр. наук, проф., РГГМУ, doganovsky@bk.ru
Догановский Дмитрий Аркадьевич, инженер, ООО «Научно-производственное объединение "Гидротехпроект"», d_dogan@mail.ru
Дрегваль Марина Станиславовна, магистр, каф. гидрологии суши РГГМУ, mariadregval@gmail.com
Еремина Татьяна Рэмовна, канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. промысловой океанологии и охраны природных вод, РГГМУ, tanya@rshu.ru
Жамойда Владимир Александрович, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотр., ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского», СПб, Vladimir_Zhamoida@vsegei.ru
Жарова Александра Дмитриевна, магистрант каф. промысловой океанологии и охраны природных вод, РГГМУ, zharovasasha94@yandex.ru
Зимин Алексей Вадимович, канд. физ.-мат. наук, и.о. зав. лаб., СПбФ Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, zimin2@mail.ru
Исаев Дмитрий Игоревич, канд. геогр. наук, доц., каф. гидрометрии РГГМУ, dii2006@mail.ru
Истомин Евгений Петрович, д-р техн. наук, проф., декан факультета информационных систем и геотехнологий, РГГМУ, biom@rshu.ru
Канджанасири Вареха, вице-ректор по науке, ун-т Питсанулок (Таиланд), dr.wireka@gmail.com
Ковалева Ольга Анатольевна, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотр. ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского», СПб, olya_pavlikova@mail.ru
Коваленко Виктор Васильевич, д-р техн. наук, проф., зав. каф. гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ, kov_v_v@mail. Ru
Колесов Александр Михайлович, главный синоптик, ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», СПб, market@meteo.nw.ru
Кондове Альфред Лоуренс, аспирант, РГГМУ, alfredkondowe@gmail.com
Кондратьев Сергей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, зам. директора Института озероведения РАН, kondratyev@limno.org.ru
Коршунов Александр Алексеевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., nnk@meteo.ru
Кудрявцев Владимир Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф., рук. лаб. спутниковой океанографии РГГМУ, kudv@rshu.ru
Лазар Михай Гаврилович, д-р. физ. наук, проф., каф. социально-гуманитарных наук, РГГМУ, mihai_lazar@mail.ru

Ланге Евгения Кирилловна, науч. сотр., Атлантическое отделение института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Калининград, evlange@gmail.com
Леонтьев Игорь Олегович, д-р. геогр. наук, вед. науч. сотр. ФГБУ науки Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, leontev@ocean.ru
Лертрактавекул Чайпат, преподаватель, ун-т Питсанулок (Таиланд), dr.chaipat@gmail.com
Малинин Валерий Николаевич, д-р. геогр. наук, проф., РГГМУ, malinin@rshu.ru
Маркова Елена Геннадьевна, науч. сотр., Институт озероведения РАН, adelmonamour@mail.ru
Моисеева Наталья Олеговна, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории Военного института (научно-исследовательского) ВКА им. А.Ф. Можайского, natali.ziadinova@yandex.ru
Ременсон Виталий Александрович, канд. физ.-мат. наук, проф., каф. технологий и средств геофизического обеспечения ВКА им. А.Ф. Можайского, natali.ziadinova@yandex.ru
Румянцева Екатерина Александровна, канд. физ.-мат. наук, начальник отдела сопровождения НИР Департамента научных исследований и перспективных разработок РГГМУ, rumkate@rambler.ru
Рябчук Дарья Владимировна, канд. геол.-минерал. наук, зав. отделом ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского», СПб, daria_ryabchuk@mail.ru
Салахнои Канасит, преподаватель, ун-т Питсанулок (Таиланд), dr.kanasit@gmail.com
Сергеев Александр Юрьевич, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр., ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского», СПб, sergeevau@yandex.ru
Семова Екатерина Владимировна, магистр, РГГМУ, e.v.semova@gmail.com
Скорик Яна Владимировна, аспирант, РГГМУ, golovanuana@gmail.com
Слесарева Людмила Сергеевна, канд. техн. наук, доц., каф. прикладной информатики, РГГМУ, biom134@gmail.com
Смышляев Сергей Павлович, д-р. физ.-мат. наук, проф., каф. метеорологических прогнозов, РГГМУ, smyshl@rshu.ru
Соколова Дарья Вадимовна, аспирант. каф. гидрогеологии и геодезии, РГГМУ, dashasokolova.v@gmail.com
Соловьев Филипп Леонидович, канд. техн. наук, начальник сектора гидрологии отдела инженерных изысканий ЗАО «Ленгипроречтранс», solovyev.filipp@gmail.com
Суванасак Термсак, преподаватель, ун-т Питсанулок (Таиланд), dr.termsak@gmail.com
Трубина Марина Августиновна, канд. геогр. наук, доц., РГГМУ, marina.tma@gmail.com
Фарджами Хоссейн, аспирант, лаб. спутниковой океанографии, РГГМУ, hfarjami@gmail.com
Федоров Михаил Петрович, д-р. техн. наук, проф., акад. РАН
Цейтлин Ирина Владимировна, методист, РГГМУ, i.tceitlin@rshu.ru
Шатрова Ольга Васильевна, аспирант каф. промысловой океанологии и охраны природных вод, РГГМУ, shatrova90@gmail.com
Шеманаев Кирилл Владимирович, аспирант каф. гидрогеологии и геодезии, РГГМУ, shemanaevk@mail.ru
Шилин Михаил Борисович, д-р. техн. наук, проф., зав. каф. экологии, РГГМУ, shilin@rshu.ru
Шмакова Мария Валентиновна, канд. техн. наук, науч. сотр., Институт озероведения РАН, m-shmakova@yandex.ru
Шнеерсон Ефим Залманович, д-р. техн. наук, проф., каф. высшей математики и теоретической механики, РГГМУ, kaf-mat@gpa-spb.ru
Шермухамедов Абдулазиз Адилхакович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. надежности наземных транспортных систем, Ташкентский автомобильно-дорожный институт, sheraziz@mail.ru
Шермухамедов Улугбек Абдулазизович, аспирант каф. ЭФА, РГГМУ, ulugbek_sher@mail.ru

Условия публикации в журнале «Ученые записки РГГМУ»

Порядок представления рукописей

- Объем статьи может составлять до 1,5 авторских листов (1 а.л. равен 40 тыс. знаков), в исключительных случаях по решению редколлегии — до 2 авторских листов.
- Рукопись должна быть представлена в напечатанном виде, а также в виде файла в формате MS Word.
- Иллюстрации должны быть включены в текст статьи, а также представлены в отдельных графических файлах, поименованых таким образом, чтобы было понятно, к какой статье они принадлежат и каким по порядку рисунком статьи они являются.
- Вместе с рукописью автор должен представить:
  - подписанный Договор на право использования научного произведения в журнале «Ученые записки РГГМУ», издателем (учредителем) которого является ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ);
  - анкету(-ы) [сведения об Авторе (Соавторах)], для Автора и всех Соавторах;
  - справку с места учебы (для студентов и очных аспирантов).
- Материалы можно направлять:
  - почтой (заказным письмом или бандеролью) по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, Российский государственный гидрометеорологический университет, Редколлегия журнала «Ученые записки РГГМУ» [также необходимо представить электронную версию материала на электронном носителе информации (флэш-карте (USB), CD-диске и т.п.)];
  - электронной почтой (e-mail): rio@rshu.ru.
- Все статьи, направляемые авторами для публикации в журналах, рецензируются согласно Положению о рецензировании научных статей в журнале «Ученые записки РГГМУ».

Требования к оформлению рукописей

- Инициалы и фамилии авторов, название, аннотация, ключевые слова — на русском и английском языках.
- Аннотация статьи объемом до 7 строк на русском и английском языках не должна содержать ссылок на разделы, формулы, рисунки, номера цитируемой литературы.
- Пронумерованный список литературы (в алфавитном порядке, сначала на русском, затем на иностранных языках) приводится в конце статьи с обязательным указанием следующих данных: для книг — фамилия и инициалы автора (редактора), название книги, место издания (город), год издания; для журнальных статей — фамилия и инициалы автора, название статьи, название журнала, год издания, том, номер, выпуск, страницы (первая и последняя). Разрешается делать ссылки на электронные публикации и адреса Интернет с указанием всех данных.

- Список литературы должен содержать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок.
- Библиографические ссылки даются в квадратных скобках в виде порядкового номера источника в библиографическом списке. Если при цитировании делается ссылка на конкретную цитату, формулу, теорему и т.п., следует указывать номер страницы, например [13, с. 23].
- Сноски помещаются на соответствующей странице текста.
- Названия зарубежных компаний приводятся в тексте без кавычек и выделений латинскими буквами. После упоминания в тексте фамилий зарубежных ученых, руководителей компаний и т.д. на русском языке, в полукруглых скобках приводится написание имени и фамилии латинскими буквами, если за этим не следует ссылка на работу зарубежного автора.
- Рисунки и таблицы располагать по тексту в соответствии со ссылкой.
- Все рисунки и таблицы должны быть пронумерованы и озаглавлены. Текст подписи рисунка помещается под рисунком, номер и название таблицы — над таблицей.
- Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул (Math Type, Microsoft Equation).
- Авторская правка в верстке — компенсационная, до пяти буквенных исправлений на странице.

Рекомендации по форматированию для подачи рукописи в редакционно-издательский отдел

- Формат: А4 (21×29,7 см) книжный.
- Поля: верхнее, левое, правое — 1,5 см; нижнее — 2 см.
- Колонтитулы: от края до верхнего — 0 см; до нижнего — 0,5 см.
- Номер страницы: внизу по центру, шрифт Times New Roman, 14.
- Междустрочный интервал — одинарный.
- Абзацный отступ — 0,75 см.
- Выравнивание — по ширине.
- Шрифт — Times New Roman, 14 (основной текст); Times New Roman, 12 (табличный текст, подрисуночная подпись, библиографический список, сноски).
- В формулах русские буквы набирать прямым шрифтом, латинские — курсивным, греческие — прямым, тригонометрические функции (sin, cos и др.) — прямым.

Внимание!

Статьи, направленные в редакцию без выполнения требований настоящих условий публикации, не рассматриваются. В случае отклонения статьи Редколлегия журнала направляет Автору мотивированный отказ.

Автор несет ответственность за точность цитат, имен, названий, библиографических ссылок на цитируемые издания и иных сведений.

Научное издание

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА № 44

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Редактор Л.Ю. Киреева
Технический редактор Ю.И. Климов

Подписано в печать 26.09.16. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,6. Тираж 500 экз. Заказ № 551.
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
Отпечатано в ЦОП РГГМУ

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС2-8484 от 07 февраля 2007 г.
в Управлении Федеральной службы в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу
Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет