

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 551.461.22 : 551.583

ШЕВЧУК ОЛЕГ ИГОРЕВИЧ

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ МИРОВОГО ОКЕАНА
В СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Специальность 25.00.28 – «Океанология»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург

2009

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ)

Научный руководитель:

доктор географических наук,
профессор

Малинин Валерий Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор географических наук,
профессор

Смирнов Николай Павлович

доктор географических наук

Добровольский Сергей Гаврилович

Ведущая организация: **Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ)**

Защита состоится " 24 " декабря 2009 г. в *15 час. 30 мин.* на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98, актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан " " ноября 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,
кандидат географических наук

В.Н. Воробьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Уровень Мирового океана является важнейшей характеристикой, определяющей как гидродинамические процессы в самом океане, так и характер взаимодействия океана и атмосферы. Изменения уровня Мирового океана тесно связаны с современными колебаниями климата, которые в свою очередь определяют испарение, осадки, стерические колебания. Эвстатические колебания можно рассматривать как индикатор глобального водообмена, перераспределяющего воды гидросферы между отдельными оболочками Земли и, прежде всего, между водами литосферы и криосферы.

Как следует из докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (IPCC, 2001, 2007), в соответствии с некоторыми сценариями изменений климата, основанными на результатах его численного моделирования, уровень Мирового океана может повыситься на 10—30 см к 2030 г. и в пределах 30-100 см (наиболее вероятно 65 см) к концу столетия. Естественно, если такое развитие изменений климата станет реальностью, то это грозит катастрофическим ущербом для инфраструктуры прибрежных территорий, где проживает около миллиарда жителей Земли. Возможно подтопление крупнейших городов мира: Лондона, Нью-Йорка, Токио, С-Петербурга и др. В зависимости от разных причин темпы и масштабы подъема уровня моря могут значительно превзойти способность антропогенных и естественных систем к адаптации.

Поэтому задача изучения долговременных колебаний уровня Мирового океана и особенно построения систем прогноза уровня Мирового океана в системе океан–атмосфера представляется чрезвычайно актуальной. Эксперты МГЭИК отнесли данный вопрос к числу важнейших проблем современной гидрометеорологии.

Цель работы: изучение межгодовых колебаний уровня Мирового океана и эвстатических факторов его формирования.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Анализ межгодовых колебаний уровня океана за период инструментальных наблюдений.
2. Выявление станций с многолетними наблюдениями за морским уровнем, обеспечивающих минимальную ошибку восстановления уровня Мирового океана (УМО) с достаточной для практических целей точностью и построение статистической модели оценки межгодовых колебаний УМО.
3. Анализ межгодовой изменчивости эвстатических факторов (испарения и осадков) формирования уровня Мирового океана. Построение диагностической статистической модели оценки межгодовых колебаний УМО на основе эвстатических факторов.
4. Сравнительный анализ вклада разных факторов в рост уровня Мирового океана в конце XX столетия.

5. Оценка связи колебаний уровня Мирового океана с приповерхностной температурой воздуха над океаном.
6. Построение физико-статистической модели прогноза межгодовых колебаний уровня Мирового океана на ближайшие десятилетия.
7. Построение адаптивной модели прогноза сезонной изменчивости уровня Мирового океана по альтиметрическим данным.

Материалы и методы. Основой работы являлись несколько глобальных архивов гидрометеорологических данных находящихся в свободном доступе в Интернет:

- футшточные данные об уровне Мирового океана полученные из архива PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level);
- альтиметрические данные центра по хранению, верификации и интерпретации спутниковой океанографической информации (AVISO) и Колорадского центра астродинамических исследований (CCAR) при Колорадском университете со спутников Topex/Poseidon и Jason-1, с пространственным разрешением $1/3^\circ \times 1/3^\circ$;
- среднемесячные значения осадков и испарения в узлах первичной широтно-долготной сетки $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ из глобального гидрометеорологического архива CDAS (Climate Data Assimilation System);
- аномалии поверхностной температуры воздуха из архива HadCrut3 с пространственным разрешением $5^\circ \times 5^\circ$;

Для выполнения поставленных задач использовался комплекс методов многомерного статистического анализа (МСА), а также теория проверки статистических гипотез и анализ временных рядов.

Научная новизна:

- Впервые построена статистическая модель, обеспечивающая минимальную ошибку восстановления межгодовых колебаний уровня Мирового океана по данным 5 береговых станций с достаточной для практических целей точностью.
- Установлены закономерности межгодовых колебаний УМО за период инструментальных наблюдений.
- Впервые выявлены особенности межгодовой изменчивости испарения, осадков и эффективного испарения над отдельными океанами и Мировым океаном в целом в период интенсивного глобального потепления климата.
- Установлена степень взаимосвязи колебаний УМО с температурой воздуха над его акваторией.
- Впервые построена физико-статистическая модель прогноза УМО на ближайшие десятилетия на основе данных о температуре воздуха над его акваторией.
- Впервые построена адаптивная модель прогноза сезонной изменчивости УМО по альтиметрическим данным.

На защиту выносятся:

1. Закономерности межгодовых колебаний уровня Мирового океана за период инструментальных наблюдений.
2. Особенности межгодовой изменчивости эвстатических факторов (осадки, испарение, эффективное испарение) над океанами.
3. Результаты прогнозирования уровня Мирового океана по данным о температуре воздуха над его акваторией на ближайшие десятилетия.
4. Адаптивная модель прогноза сезонной изменчивости уровня Мирового океана по альтиметрическим данным.

Практическая значимость работы. Полученные в работе результаты могут быть использованы при решении задач мониторинга УМО и моделирования климата, а также при разработке долгосрочных прогнозов межгодовых колебаний и сезонного хода УМО.

Личный вклад автора. Подготовка архивов информации, проведение статистических расчетов, выполнение необходимых графических построений, обобщение и анализ результатов.

Апробация работы и публикации. Основные положения и отдельные результаты обсуждались на итоговых сессиях Ученого Совета РГГМУ, 2005 и 2006; на международной школе-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изменение климата и окружающая среда», РГГМУ, 2005; на научном семинаре «Проблемы изменения климата в полярных широтах» в рамках проекта BRIDGE «Keeping it Cool», Университет г. Шеффилда, Великобритания, 2007; международной научно-практической конференции «Географическое образование и наука в России: история и современное состояние», СПбГУ, 2008; всероссийской научной конференции «Селиверстовские чтения», 2009.

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них 2 статьи в рецензируемых журналах (по перечню ВАК).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и библиографического списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 113 страниц, включая 21 таблицу и 34 рисунка. Список литературы составляет 84 наименования, в том числе 43 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования.

Первая глава «*Колебания уровня Мирового океана в современных климатических условиях по данным наблюдений*» посвящена реконструкции и исследованию межгодовой изменчивости уровня Мирового океана.

В разделе 1.1 «*Краткий обзор исследований колебаний уровня океана на основе футшточных наблюдений*» рассматриваются исследования колебаний уровня океана на основе футшточных наблюдений по литературным данным

(Gutenberg, 1941; Fairbridge, Krebs, 1962; Калинин, Клиге, 1972; Дуванин и др., 1957; Клиге 1985; Church et al., 2006; Jevrejeva et. al., 2006 и др.). Показано, что в современную эпоху наблюдается повсеместное повышение УМО.

В общем, в XX в. рост уровня согласно обобщенным оценкам многих исследователей, приведенных в докладе Межправительственной группой экспертов по изменениям климата в 2001 г. составил 1,5–2 мм/год. Темпы роста в последние десятилетия заметно увеличились. В частности за время интенсивного потепления климата с 1985 по 2001 гг. по данным Church et al. (1985 – 2001 гг.) – 3,27 мм/год, Jevrejeva et. al. – 3,68 мм/год.

Раздел 1.2 «Межгодовая изменчивость уровня Мирового океана по данным футшточных наблюдений» посвящен реконструкции и анализу УМО с 1861 – 2005 гг. Разными авторами (Клиге, 1985; Barnett, 1984; Douglas, 1997; Fairbridge et al., 1962; Gornits et al., 1982) расчет УМО осуществлялся за различные, но не одинаковые промежутки времени. Поэтому было выполнено арифметическое осреднение указанных рядов за общий период с 1901 по 1958 г. Полученный таким образом ряд УМО имеющий довольно короткую длину (рис. 1, линия 1) считался базовым. После этого решалась задача его удлинения: вперед с 1958 г. и назад до 1901 г. С этой целью использовался глобальный архив футшточных (береговых) наблюдений уровня моря – Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), находящийся в свободном доступе в сети Интернет. Реконструкция УМО в обе стороны осуществлялась методом пошаговой множественной регрессии, который позволяет последовательно отбирать наиболее значимые факторы и подробно исследовать их статистическую значимость. При этом линейная модель для расчета УМО ($h_{УМО}$) имеет вид:

$$h_{УМО} = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j h_j \quad (1)$$

где h_j – уровень моря на j станции; m – число станций в модели.

В состав предикторов была включена 21 станция, длина наблюдений на которых за уровнем превышает 90 лет, причем в качестве зависимой выборки использовался период с 1909 по 1958 гг., т.е. 50 лет. Коэффициенты модели множественной линейной регрессии находились с помощью метода включения переменных. Порядок модели (ее оптимальность) оценивался по минимуму среднеквадратической ошибки при условии значимости всех коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента и значимости модели по критерию Фишера (при уровне значимости 5%). Было получено, что оптимальной является модель, для которой $m=5$. В порядке значимости, то есть по вкладу в описание изменчивости исходного ряда $h_{УМО}$, в данную модель входят: New York, Seattle, Galveston, Swinoujście и Ratan. При этом уже первый коэффициент корреляции УМО со ст. New York достигает 0,91. Коэффициент детерминации данной мо-

дели равен $R^2 = 0,94$, то есть модель описывает 94 % дисперсии функции отклика, а стандартная ошибка модели равна $\sigma_{y(x)} = 6,6$ мм.

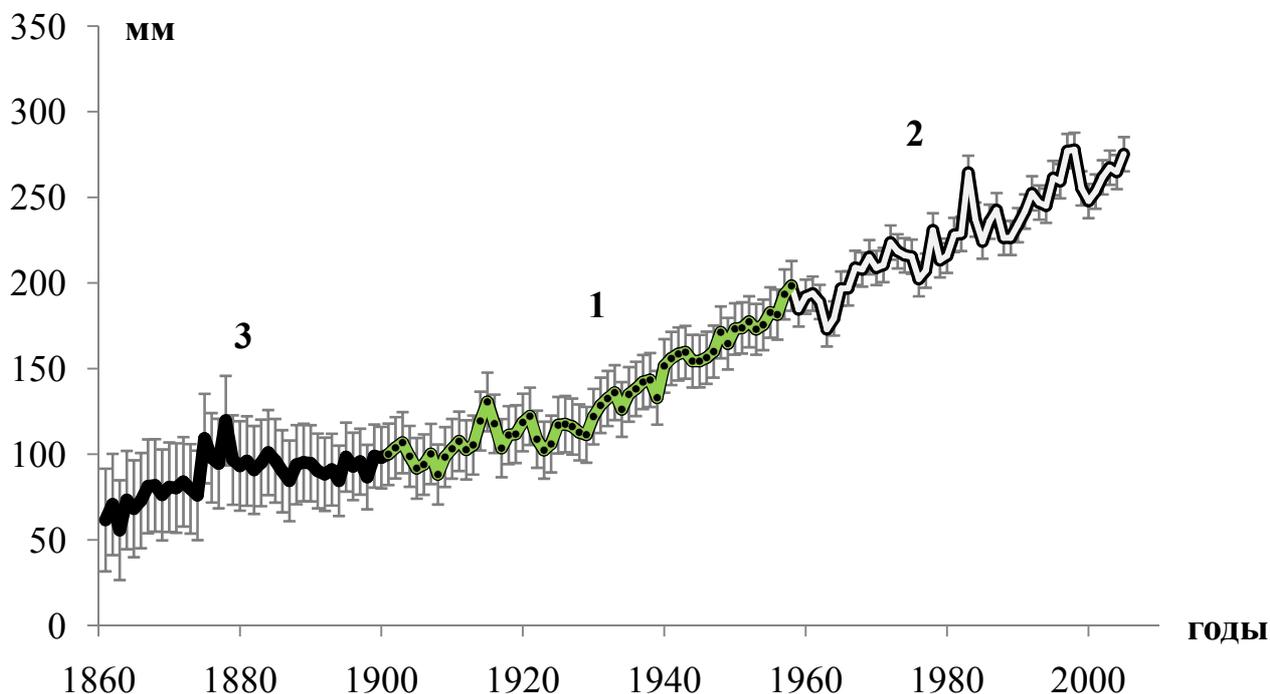


Рисунок 1 – Межгодовая изменчивость уровня Мирового океана (1 – базовый уровень; 2 – реконструкция уровня вперед; 3 – реконструкция уровня назад). В качестве доверительного интервала принято значение $\pm\sigma$

На зависимых данных модель (1) с достаточно высокой точностью описывает глобальную изменчивость исходного ряда УМО. Принимая во внимание данное обстоятельство, нами был произведен расчет УМО за независимый промежуток времени с 1959 по 2005 гг. В результате этого общая продолжительность временного ряда УМО возросла до 105 лет (с 1901 по 2005 гг.). Его межгодовой ход также приведен на рисунке 1 (линия 2).

Далее решалась задача реконструкции УМО назад до 1901 г. (рис. 1, линия 3). С этой целью было отобрано 8 станций, для которых общее начало наблюдений за уровнем начинается с 1861 г., а общий конец наблюдений датируется 1934 г. Таким образом, зависимая выборка имеет длину 34 года (с 1901 по 1934 гг.). Использование аппарата пошаговой регрессии позволило установить, что оптимальной также следует считать модель с пятью предикторами. В порядке значимости в нее входят следующие станции: Brest, Lyokki, Swinoujście, San Francisco, Lupyrtti. Первый коэффициент корреляции УМО со ст. Brest равен $r = 0,63$, коэффициент детерминации данной модели равен $R^2 = 0,75$, стандартная ошибка модели $\sigma_{y(x)} = 6,5$ мм. При этом коэффициенты регрессии значимы по критерию Стьюдента, а сама модель значима по критерию Фишера (при уровне значимости 5%). Заметим, что хотя доля описания дисперсии исходного УМО по данной модели существенно меньше по сравне-

нию с моделью реконструкции УМО вперед, однако оценки случайной ошибки $\sigma_{y(x)}$ практически одинаковы.

В таблице 1 приводятся более подробные сведения об оценках линейного тренда и статистических характеристиках рассматриваемых рядов УМО в XX в. по независимым данным разных авторов. Отметим, что в работах Church et. al., (2006) и Jevrejeva et. al., (2006) УМО определялся осреднением большого числа береговых станций из архива PSMSL методами пространственной интерполяции (например, в работе Jevrejeva et. al., использовалось 1023 станции). Установлено, что расхождения между средними значениями и дисперсиями по критериям Стьюдента и Фишера являются незначимыми. Оценки трендов тоже очень близки друг к другу.

Таблица 1 – Оценки линейного тренда и статистических характеристик рядов УМО за 1901 – 1999 гг.

Авторы	R^2	тренд	σ_ε	Среднее значение	$\sigma_\varepsilon/X_{cp}$
Малинин, Гордеева, Шевчук, 2007	0,96	1,79	10,40	170,17	0,06
Church et. al., 2006	0,97	1,65	9,09	166,93	0,05
Jevrejeva et. al., 2006	0,94	1,89	13,77	167,73	0,08

Таким образом, выявлены станции с многолетними наблюдениями за морским уровнем, обеспечивающие минимальную ошибку восстановления УМО с достаточной для практических целей точностью. А результаты сравнения сделанных выше расчетов с расчетами других авторов свидетельствуют, что выполненная автором реконструкция УМО является весьма точной, отражает общие закономерности его межгодовых колебаний и совместима с аналогичными данными других авторов. Однако принципиальное ее отличие заключается в том, что оценки УМО могут быть получены по регрессионной модели с малым числом станций.

В разделе 1.3 «Изменчивость уровня Мирового океана по альтиметрическим данным» рассмотрен межгодовой ход УМО за период 1993–2008 гг., построенный по среднемесячным альтиметрическим данным с изомаршрутных спутников Торех/Poseidon и Jason-1 с учетом поправки обратного барометра в университете Колорадо. Главной его особенностью является наличие ярко выраженного тренда, равного $Tr=3,2\pm 0,4$ мм/год, который после исключения поправки на гляциоизостатический эффект поверхности океанов, становится равным $Tr=2,9\pm 0,4$ мм/год.

Выполнено совмещение УМО по альтиметрическим и береговым наблюдениям, которое возможно двумя простыми способами. Первый – по совмещению средних значений двух рядов. Второй способ заключается в построении модели регрессии между альтиметрическим и футшточным рядами УМО.

В итоге показано, что второй способ по существу представляет собой тренд, свойственный футшточному ряду УМО за период 1993–2005 гг., в то время как первый способ и соотношение $X_{\text{альт}}^c = 258 + X_{\text{альт}}$, связывающее альтиметрические и футшточные данные, можно рассматривать в виде основы для построения мониторинга УМО по спутниковой информации.

Глава 2 «Факторы формирования уровня Мирового океана и их анализ».

В разделе 2.1 «Эвстатические изменения уровня океана как интегральный индикатор глобального водообмена» показано, что УМО отражает процессы перераспределения природных вод в гидросфере, представляющей сплошную оболочку Земли, содержащую воду во всех агрегатных состояниях в пределах Мирового океана, криосферы, литосферы и атмосферы и принимающую непосредственное участие в планетарном круговороте влаги. Поэтому эвстатические колебания УМО можно рассматривать как интегральный индикатор глобального водообмена.

Раздел 2.2 «Эвстатические колебания уровня Мирового океана» посвящен исследованию эвстатических колебаний УМО. В частности в подразделе 2.2.1 «Вертикальный влагообмен в системе океан-атмосфера» рассматривается глобальный гидрометеорологический архив CDAS, являющегося частью системы «ретроспективного» анализа» (реанализа) NOAA NCEP/NCAR Reanalysis (Kalnay et al., 1996) и находящийся в свободном доступе в сети Интернет, из которого заимствованы поля среднемесячных значений испарения, осадков и их разности $E_{\text{эф}} = E - P$ (эффективное испарение) над акваторией Мирового океана (МО), исключая Северный Ледовитый океан. Затем было осуществлено осреднение исходных данных по пятиградусным трапециям акватории МО, что позволило сократить число узлов с 15965 до 1305.

В качестве основного периода исследования выбран промежуток с 1980 по 2005 гг., характеризующийся особенно резким потеплением глобального климата. Для каждого из трех океанов рассчитаны зонально-осредненные значения испарения, осадков и эффективного испарения, которые затем дополнительно усреднены для отдельных океанов и МО в целом. Установлено, что в межгодовом ходе испарения и осадков присутствует сильный положительный тренд, который над МО в осадках составляет 4,2 мм/год, а для испарения – 3,6 мм/год. Главной причиной их формирования является интенсивное потепление климата в рассматриваемый период времени, которое характеризуется трендом в глобальной температуре воздуха равным $Tr = 0.18 \text{ }^\circ\text{C } \Delta T/10\text{лет}$. Показано, что корреляция глобальной температуры воздуха с рядами испарения и осадков для МО, составляет соответственно $r_{E,T} = 0,82$ и $r_{P,T} = 0,80$.

Поскольку количество выпавших осадков над МО растет быстрее испарения, то тренд в эффективном испарении оказывается отрицательным (рис. 2). Наибольшая величина его отмечается для Атлантического и Индийского океанов. Для Тихого океана тренд незначим по критерию Стьюдента. Величина тренда в межгодовом ходе эффективного испарения для МО в целом составляет $Tr = -0,6$ мм/год. Итак, уменьшению эффективного испарения на 0,6 мм/год со-

ответствует увеличение УМО на 0,6 мм/год или на 217 км³/год. Поскольку общий тренд УМО за рассматриваемый промежуток времени составляет около 2,4 мм/год, то вклад эффективного испарения в изменения УМО достигает 25 %.

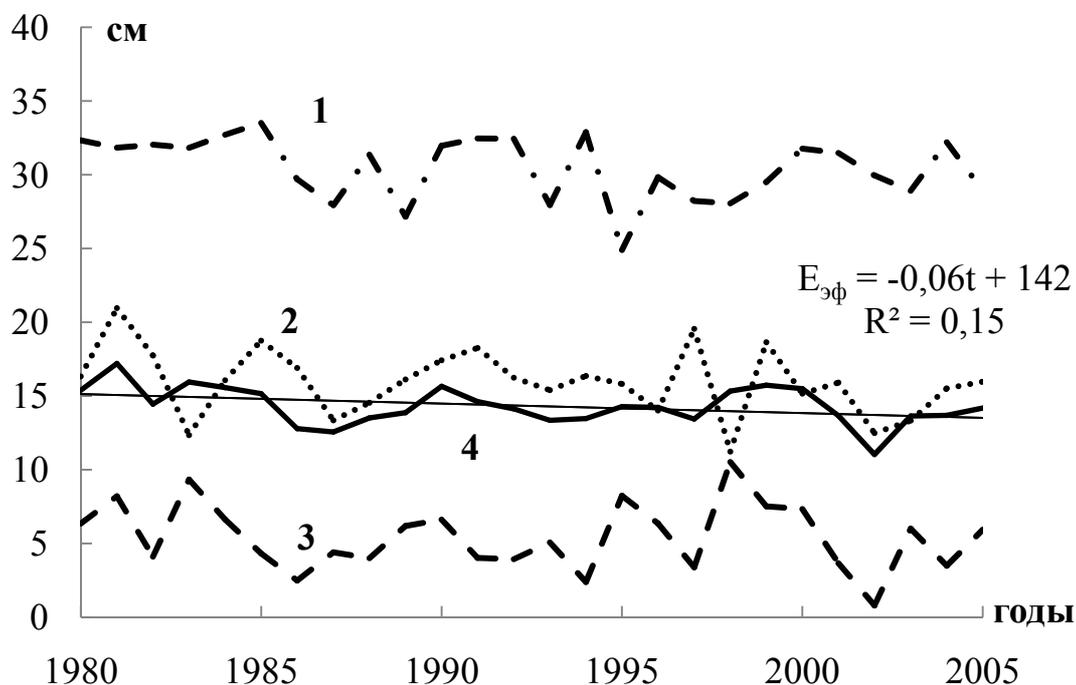


Рисунок 2 – Межгодовой ход эффективного испарения над отдельными океанами за период 1980-2006 гг. в см/год. (1 – Атлантический, 2 – Индийский, 3 – Тихий, 4 – Мировой океан)

Межгодовая изменчивость испарения и осадков над отдельными океанами и МО в целом примерно одинакова и невелика, коэффициент вариации составляет $C=0,2-0,4$. Существенно более высокой оказывается изменчивость $E_{эф}$, так как его средние значения существенно меньше средних значений E и P . Самый большой коэффициент вариации отмечается для Тихого океана ($C=0,42$). Для МО в целом $C=0,10$. Заметим, что он значительно больше коэффициента вариации притока пресных вод к МО ($C=0,02$).

Далее построена диагностическая модель оценки внутригодовых изменений уровня Δh_M , определяемых по центральным разностям, в зависимости от $E_{эф}$ в узлах сеточной области Мирового океана

$$\Delta h_M = a_0 + a_1 E_{эф1} + a_2 E_{эф2} + \dots + a_{10} E_{эф10} \quad (2)$$

С помощью данной модели легко вычислить оценки Δh_M , а затем значения среднего годового УМО как $h_{M(i+1)} = h_{M(i-1)} + 2\Delta h_{Mi}$, межгодовой ход которого приведен на рисунке 3.

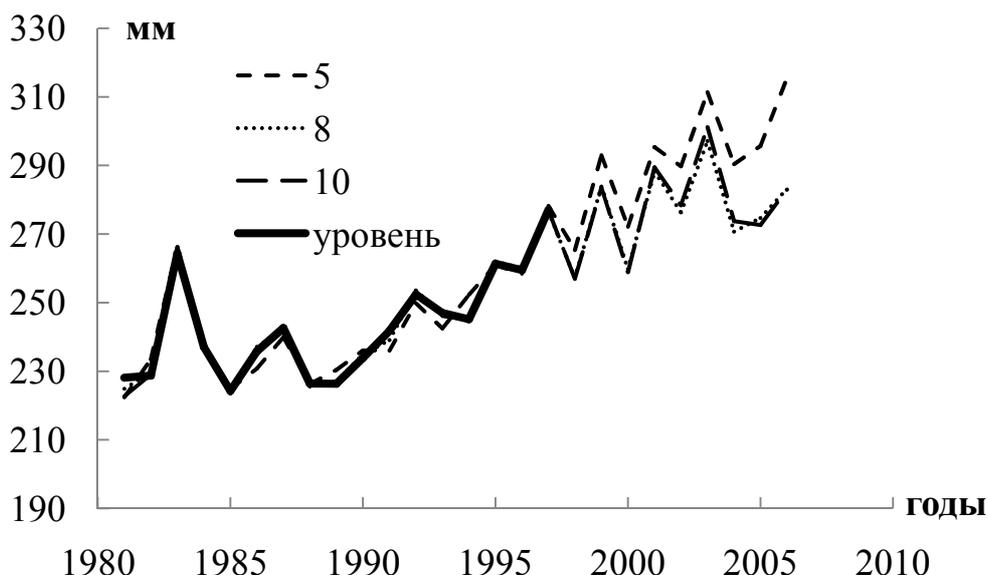


Рисунок 3 – Изменения УМО за период 1981–2006 гг., рассчитанные по различным вариантам (5, 8 и 10 предикторов) модели (2) по данным об эффективном испарении с поверхности океанов

В подразделе 2.2.2 «Приток пресных вод к океану. Айсберговый сток» по литературным данным рассмотрен приток пресных вод к океану и айсберговый сток.

В разделе 2.3 «Стерические колебания уровня Мирового океана» показано, что за период с 1955 по 2003 год, подъем уровня из-за термического расширения в слое 0-700 м Мирового Океана составляет приблизительно 0.33 мм/год. Причем наибольшее влияние на термическое расширение оказывает нагрев Атлантического океана, который описывает примерно половину данной величины.

В разделе 2.4 «Сравнительный анализ вклада разных факторов в рост уровня Мирового океана в конце XX столетия» представлены последние оценки вклада различных факторов в колебания УМО по данным четвертого доклада МГЭИК за 1961-2003 и 1993-2003 гг. Показано, что точность многих оценок является весьма низкой. В последнее десятилетие отмечается резкое увеличение вклада всех факторов. В частности, в 4 раза возросли вклады стерической компоненты и гренландского ледяного щита, причем по абсолютной величине преобладает вклад термического расширения вод океана, который составляет половину роста УМО по данным альтиметрических наблюдений. Изменения массы льда Антарктиды за период 1961-2003 гг. определены с ошибкой в 3 раза превышающей саму оценку. Поэтому величина невязки (дисбаланса), равная 1,4 мм/год, превышает вклад любого из факторов. Еще больше дисбаланс за период 1993-2003 гг. (2 мм/год). Рост УМО эксперты объясняют плотностными изменениями толщи вод океана, колебаниями таяния как горных ледников, так и ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии. Однако, таяние горных ледников, которое действительно весьма существенно, может давать непосредствен-

ный вклад в изменения УМО только с ледников, расположенных на островах в Северном Ледовитом океане и территории Аляски. Горные ледники, находящиеся в Европе, Азии, Африке и Ю. Америке, могут влиять на УМО, очевидно, только через приток речных вод к океану. Поэтому вряд ли имеет смысл непосредственно учитывать их вклад в тренд УМО (Малинин, 2009). Как известно, тренд в притоке материковых вод к МО отсутствует. Отсюда следует, что оценки вклада горных ледников в колебания УМО являются многократно преувеличенными. Кроме того, экспертами МГЭИК не учитывается вклад в УМО изменения вод литосферы.

Поэтому был выполнен сравнительный анализ вклада разных факторов в рост уровня Мирового океана в конце XX в. (1980-1999 и 1990-2000 гг.) на основе уравнения пресноводного баланса океана (табл. 2). Установлено, что полученные невязки существенно меньше аналогичных ошибок, полученных экспертами МГЭИК на основе изменений содержания воды в криосфере и литосфере.

Таблица 2 – Оценка вклада разных факторов в изменения УМО за различные промежутки времени XX столетия

Период времени		1980–1999 гг.	1990–2000 гг.
Изменение уровня Мирового океана, мм/год	По данным наблюдений	1,9	2,3
	Вертикальный влагообмен (P–E)	0,5	0,2
	Стерические колебания	0,2	0,6
	Твердый сток Антарктиды	0,6	1,1
	Донное таяние шельфовых ледников	0,3	0,4
	Суммарный сток Гренландии	0,1	0,2
	Невязка (дисбаланс)	0,2	-0,3

Глава 3 «Возможные изменения уровня Мирового океана в ближайшие десятилетия». В разделе 3.1 «Сценарии возможных изменений климата в XXI в. и их влияние на уровень Мирового океана» показано, что УМО можно рассматривать в качестве индикатора изменений климата.

В разделе 3.2 «Влияние межгодовых колебаний температуры воздуха на уровень океана» по литературным данным показаны связи между значениями УМО и аномалиями температуры воздуха, сделанные разными авторами в разное время. Выявленные связи подтверждаются высокими коэффициентами корреляции 0,80–0,95 при запаздывании температуры воздуха относительно УМО на 18, 19, 20, 30 лет. Очевидно, в этих случаях рост УМО может быть связан с «медленными» изменениями эвстатической и стерической компонент, т.е. с изменениями массы ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии, а также повышением температуры воды в толще вод океана. В разделе 3.3 «Физико-статистическая модель прогноза межгодовых колебаний уровня Мирового океана» на основе аномалий приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) из архива HadCRUT3 за период с 1850 года и обновляемый каждый месяц по на-

стоящее время построена физико-статистическая модель прогноза межгодовых колебаний УМО.

С этой целью вначале был сформирован новый архив, который содержит только узлы, находящиеся непосредственно над акваторией океана и имеющие минимальное число пропусков. В результате из 2592 точек в новый архив вошло 196. Длина исходной матрицы значений температуры воздуха составила 107 (1901-2007 гг.) лет, а длина зависимой выборки $n=99$ (1901–1999 гг.). Большая их часть охватывает прибрежные районы вдоль всех материков земного шара и северную часть Атлантического океана, причем в южном полушарии их менее 20 %. В качестве функции отклика использовался рассчитанный УМО на основе футшточных (береговых) наблюдений за 1901–1999 гг..

Прогностическая регрессионная модель средних годовых значений УМО в зависимости от аномалий среднегодовой температуры воздуха над океаном имеет вид

$$h_{\text{УМО}i} = f(\Delta T_{1(i-\tau)}, \Delta T_{2(i-\tau)}, \dots, \Delta T_{m(i-\tau)}), \quad i=1, m, \quad (3)$$

где τ – сдвиг в годах, m – число исходных точек ($m=196$).

Непосредственное применение к исходной матрице ПТВ метода включения переменных позволило осуществить расчет полного комплекса пошаговых моделей для сдвигов от $\tau=0$ до $\tau=33$ лет до последнего шага, на котором все включаемые в модель предикторы еще являются значимыми. Таким образом, общее число моделей составило более 500. Наиболее сложным моментом сравнения моделей является оценка точности их по стандартной ошибке $\sigma_{y(x)}$. Это связано с явной нестационарностью ряда УМО. Действительно, к последнему сдвигу длина ряда уменьшается от $n=99$ до $n=66$ значений. Из-за мощного тренда выборочные оценки средней и стандартного отклонения сильно изменяются. Так, для исходного ряда стандартное отклонение составляет $\sigma_{\text{УМО}} = 53,05$ мм/год, а при сдвиге $\tau=33$ лет $\sigma_{\text{УМО}} = 38,29$ мм/год. Для устранения влияния нестационарности функции отклика введен коэффициент эффективности модели $\gamma = \sigma_{y(x)} / \sigma_{\text{УМО}}$. Самый высокий коэффициент эффективности отмечается на 15 шаге для сдвига $\tau=21$ г., на котором он равен $\gamma=0.25$. Поэтому прием его за основу при анализе прогностических оценок УМО.

Из сравнения моделей для различных сдвигов следует, что уже на первом шаге включаемая переменная описывает 52-70% дисперсии функции отклика. При этом почти на всех сдвигах (в 30 случаях из 34) первой переменной является точка с координатами $32,5^\circ$ с.ш. и $137,5^\circ$ в.д., расположенная вблизи побережья Японии.

В разделе 3.4 «Прогностические оценки уровня Мирового океана на ближайшие десятилетия» представлены результатам построения прогностических моделей для основного сдвига $\tau=21$ год. Приводится распределение статистических параметров до 19 шага включительно. Исходные данные ПТВ позволяют рассчитать прогностические значения УМО на 29 лет вперед, т.е. на 2000-2028

гг. На рисунке 4 представлены его значения для всех 19 шагов за независимый период 2000-2028 гг. Весьма важно, что разброс прогностических оценок уровня на каждый год относительно невелик и составляет в среднем около 4,5 см. При этом максимальный разброс оценок отмечается в 2003 г. (разброс 7 см), а минимальный – в 2011 г. (разброс 2 см). Принимая во внимание данное обстоятельство, очевидно, вряд ли имеет смысл придавать значение конкретным оценкам прогностических значений УМО и вполне достаточно ограничиться лишь величиной тренда (Tr).

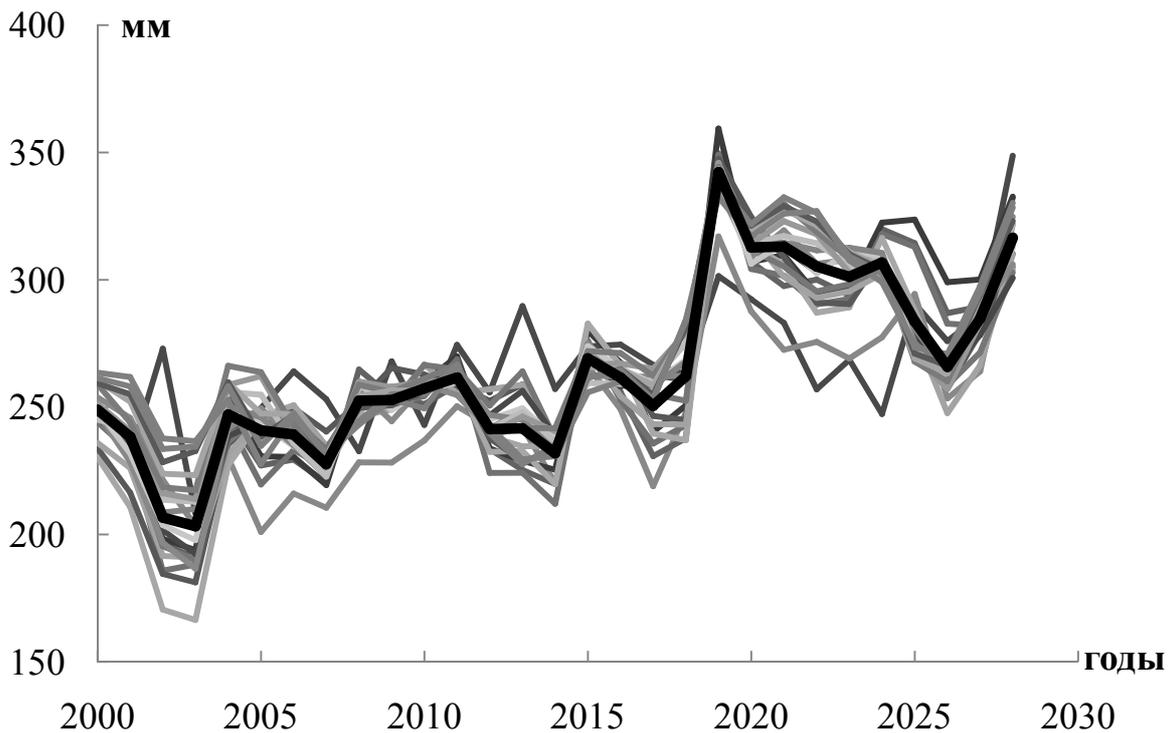


Рисунок 4 – Прогностические значения УМО за период 2000-2028 гг., рассчитанные по модели (4) при запаздывании уровня на 21 год для различных шагов от $m=1$ до $m=19$. Жирная линия – осредненная кривая по 19 моделям УМО

На первом шаге $Tr=2,6$ мм/год, затем вплоть до 13 шага его величина $Tr \geq 3,0$ мм/год с максимумом на 3 шаге ($Tr=3,8$ мм/год). После этого до 19 шага тренд медленно убывает до $Tr=2,8$ мм/год. Величина тренда по осредненной кривой для 19 моделей равна $Tr=3,1$ мм/год. Таким образом, результаты расчетов свидетельствуют, что в ближайшие годы следует ожидать сравнительно быстрого роста УМО.

В разделе 3.5 «Адаптивная модель прогноза сезонной изменчивости УМО по альтиметрическим данным» обсуждаются их закономерности на основе данных университета Колорадо (США) за период 1993-2008 гг. При этом рассмотрены две прогностические модели сезонных колебаний УМО: детерминированная модель в виде суммы тренда и годовой гармонике УМО и адаптивная модель линейного роста с аддитивной сезонностью.

После приведения ряда УМО к стационарному виду путем исключения трендовой компоненты, был выполнен гармонический анализ, который позволил выделить значимую годовую гармонику. Остальные гармоники по критерию Стьюдента оказались незначимыми. Вклад годовой гармоники в дисперсию ряда УМО составляет 3,6 %, а ее амплитуда – 4,13 мм. Таким образом, на вклад остаточной компоненты в колебания УМО, характеризующей случайные колебания, приходится 4,2 %, а стандартное отклонение ее равно 3,1 мм. Отсюда следует, что вклад в сезонно-межгодовые колебания УМО космогеофизических и геолого-геодинамических факторов в современных климатических условиях ничтожно мал, они практически полностью обусловлены соответствующими изменениями климата.

Для адаптивного прогноза использовалась модель Тейла-Вейджа, описывающая сезонные явления с линейным ростом. Отличительной чертой таких моделей служит возможность «подстраиваться» под изменения временного ряда, придавая больший вес (более высокую информационную ценность) тем наблюдениям, которые ближе к текущему моменту прогнозирования. В результате возможно построение самокорректирующихся моделей, способных учитывать результат прогноза, сделанного на предыдущем шаге. Скорость реакции модели на изменения в динамике процесса характеризует так называемый параметр адаптации. Этот параметр адаптации должен быть выбран таким образом, чтобы обеспечивалось адекватное отображение тенденции при одновременной фильтрации случайных отклонений. Подбор оптимального параметра адаптации осуществлялся по минимизации среднеквадратической ошибки модели на ретроспективном статистическом материале.

С целью удобства использования исходных альтиметрических данных в практических расчетах предварительно было осуществлено их среднемесячное осреднение. Вся выборка за 1993-2008 гг. (N=168) была разделена на зависимую (1993-2004 гг.) и независимую (2005-2008 гг.) части. По зависимой части осуществлялось построение самой модели и ее верификация, а независимые данные использовались для проверки прогнозов УМО. Результаты тестирования и опытных прогнозов среднемесячных значений УМО на независимых данных показали возможность прогноза сезонного хода УМО на 4 года, т.е. на 48 месяцев. В результате прогноза по адаптивной модели коэффициент детерминации 0,75 и ошибка 2,62 мм, а для детерминированного прогноза $R^2=0,73$ и $\sigma_{y(x)}=2,86$ мм.

Рассмотрены возможные изменения УМО в течение 2009-2012 гг. (рис. 5), рассчитанные по обеим моделям. В этом случае верификация моделей осуществлялась для выборки 1993–2008 гг. Нетрудно видеть, что обе модели дают согласованные оценки возможных изменений УМО. При этом даже скорость роста уровня примерно одинакова. Для детерминированной модели он соответствует зависимой выборке и составляет 3,26 мм/год, а для адаптивной модели – 3,54 мм/год. Итак, к 2013 г. УМО может повыситься на 13–14 мм по сравнению с 2009 г.

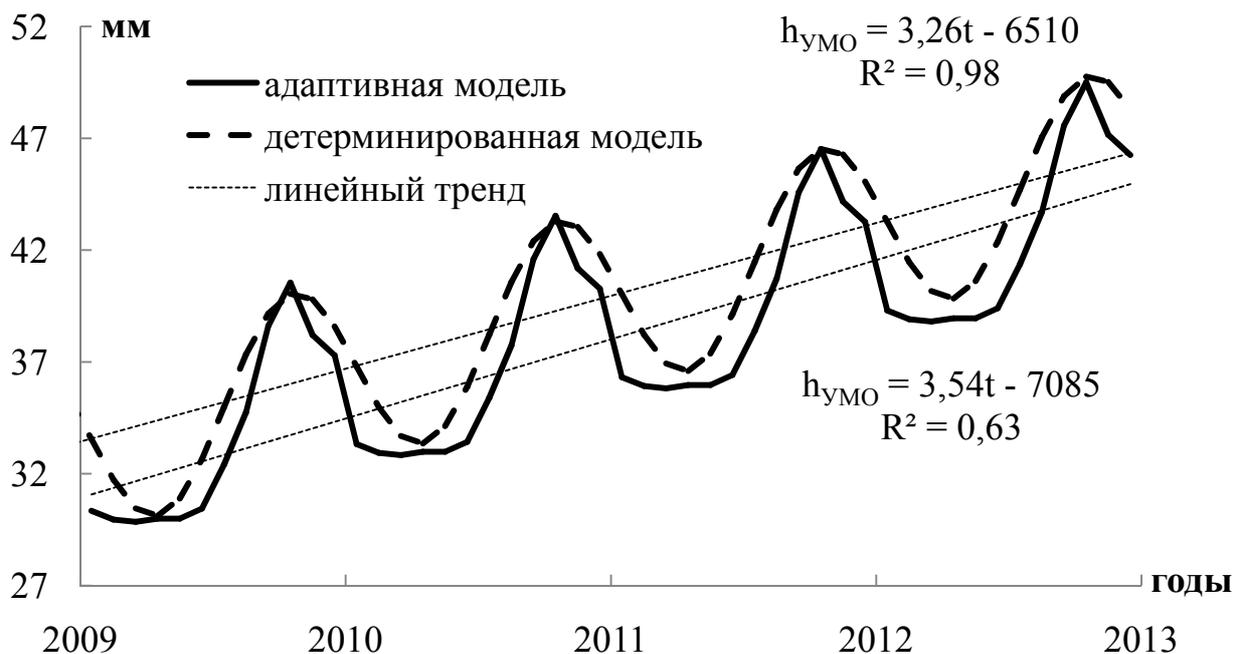


Рисунок 5 – Независимый прогноз УМО по адаптивной и детерминированной моделям и их линейные тренды

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Впервые построена статистическая модель УМО, обеспечивающая минимальную ошибку его восстановления по данным 5 береговых станций с достаточной для практических целей точностью и рассчитан межгодовой ход УМО с 1861 по 2005 г., т.е. за период инструментальных наблюдений. Показано, что полученные оценки УМО не уступают в точности результатам расчетов Church et al. и Jevgeeva et al., в которых УМО вычислялся пространственным осреднением по данным более 1000 береговых станций. В межгодовом ходе УМО довольно отчетливо выделяется несколько периодов с различным характером изменения УМО, для которых локальные тренды существенно различаются. Это довольно быстрый рост УМО в период с 1861 по 1878 г. ($T_r = 2,0$ мм/год), затем в течение периода с 1879 по 1923 г. уровень практически не менялся, т.е. наблюдалась фаза относительного стояния уровня ($T_r = 0,4$ мм/год), затем вплоть до 2005 г. он опять начал быстро расти ($T_r = 2,0$ мм/год). В период интенсивного потепления климата (1976-2005 гг.) тренд УМО не изменялся (2,0 мм/год). В течение XX в. величина тренда составляла 1,8 мм/год.

2. Впервые выполнена оценка межгодовой изменчивости эвстатических факторов формирования УМО (испарение, осадки, эффективное испарение) на основе данных архива CDAS (Climate Data Assimilation System) за период с 1980 по 2006 г. Для временных рядов осадков и испарения характерен ярко выраженный положительный тренд, описывающий более 50 % дисперсии. Самый высокий тренд, как в осадках, так и в испарении отмечается над Индийским океаном. Величина тренда для осадков над Мировым океаном составляет $T_r =$

4,2 мм/год, а для испарения $Tr = 3,6$ мм/год, соответственно тренд в эффективном испарении оказывается отрицательным. Вследствие этого в течение 1980-2005 гг. происходил рост УМО со скоростью 0,6 мм/год, что соответствует 217 км³/год. Корреляция рядов испарения и осадков с глобальной температурой воздуха составляет соответственно $r=0,82$ и $r=0,80$.

3. Впервые построена диагностическая модель средних годовых значений УМО по данным о компонентах вертикального влагообмена над океанами. Оптимальная модель включает 8 точек по эффективному испарению $E_{эф}$, относительно равномерно расположенных на акватории Мирового океана, причем в зоне АЦТ находится сразу три точки. На основе независимых данных $E_{эф}$ за 1998-2005 гг. рассчитаны значения УМО до 2006 г. Сопоставление трендов в УМО, рассчитанного по модели и по альтиметрическим данным за период 1993-2006 гг. показало их хорошее соответствие (2,7 и 2,9 мм/год). Кроме того, вычисленные по модели значения УМО в период 1981-2000 гг. согласуются с оценками УМО Church et al. и Jevreeva et al., коэффициенты корреляции между ними соответственно равны 0,85 и 0,91.

4. Выполнен сравнительный анализ вклада разных факторов в рост уровня Мирового океана в конце XX в. (1980-1999 и 1990-2000 гг.) на основе уравнения пресноводного баланса океана. С учетом оценок трендов в эффективном испарении, материковом притоке вод, твердом и жидком стоке с Антарктиды и Гренландии, в таянии шельфовых ледников в Антарктиде и стерических колебаний уровня океана получены суммарные оценки тренда в УМО. Сравнение с оценками тренда УМО по альтиметрическим данным (1,9 мм/год за 1980-1999 и 2,3 мм/год за 1990-2000 гг.) показало, что невязка в первом случае составляет 0,2 мм/год, а во втором -0,3 мм/год, т.е. существенно меньше, чем аналогичные ошибки, полученные экспертами МГЭИК на основе изменений содержания воды в криосфере и литосфере.

5. Установлено наличие высокой корреляции приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) над океаном с УМО при его запаздывании относительно ПТВ на основе архива HadCrut3. В частности, в точке, расположенной вблизи побережья Японии ($\varphi = 32,5^\circ$ с.ш., $\lambda = 137,5^\circ$ в.д.), корреляция температуры воздуха с УМО при его запаздывании относительно ПТВ не опускается ниже $r=0,70$ на всех сдвигах от 0 до 35 лет.

6. Впервые построена физико-статистическая модель прогноза УМО при запаздывании последнего относительно ПТВ. В результате расчета комплекса моделей для сдвигов от $\tau=0$ до $\tau=33$ лет установлено, что оптимальной в статистическом смысле является модель при запаздывании УМО на 21 год. Оценка прогностического тренда УМО до 2029 г. показала его небольшое уменьшение ($Tr = 2,8$ мм/год) по сравнению с трендом в начале XXI в. ($Tr = 3,1$ мм/год). Можно полагать, что в ближайшие годы повышение УМО будет продолжаться с некоторым замедлением темпов роста по сравнению с началом XXI в.

7. Впервые построена адаптивная модель прогноза сезонной изменчивости УМО на 2009-2012 гг. на основе альтиметрических данных. С этой целью ис-

пользована модель Тейла-Вейджа, описывающая сезонные явления с линейным ростом. Одновременно для сравнения рассматривалась «детерминированная» модель, состоящая из линейного тренда и годовой гармоники, описывающая 94 % дисперсии исходного ряда УМО. Показано, что обе модели дают согласованные оценки возможных изменений УМО. Для детерминированной модели скорость роста УМО соответствует зависимой выборке и составляет 3,23 мм/год, а для адаптивной модели – 3,54 мм/год. Установлено, что адаптивная модель обладает более высокой точностью, так как дополнительно учитывает определенную часть дисперсии, сосредоточенной в случайной компоненте разложения. В результате расчетов выявлено, что по сравнению с 2009 г. УМО к 2013 г. может повыситься на 13–14 мм.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. В.Н. Малинин, О.И. Шевчук. Эвстатические колебания уровня Мирового океана в современных климатических условиях // Изв. Рус. геогр. общества. 2008. Т.140. Вып.4. С. 20-30.

2. Клиге Р.К., Малинин В.Н., Шевчук О.И. Колебания уровня Мирового океана в XX столетии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. №1. С. 7-14.

Материалы конференций

3. О.И. Шевчук. О проблеме мониторинга уровня Мирового океана // Сборник трудов международной школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изменение климата и окружающая среда». - СПб.: Гранд, 2005. – С. 235-239.

4. О.И. Шевчук. К анализу трендов уровня Мирового океана // Материалы итоговой сессии Ученого совета 25-26 января 2006 года. – СПб.: изд-во РГГМУ, 2006. – С. 63-64.

5. В.Н. Малинин, О.И. Шевчук. О прогнозе колебаний уровня Мирового океана на основе физико-статистической модели // Географическое образование и наука в России: история и современное состояние. Материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 3-4 декабря 2008 г. – СПб.: изд-во СПбГУ, 2009. – (в печати).

6. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Шевчук О.И. Статистический анализ изменчивости уровня Мирового океана по альтиметрическим данным // География и геоэкология на современном этапе взаимодействия природы и общества: материалы Всерос. научн. конф. «СЕЛИВЕРСТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ», Санкт-Петербург, 19-20 ноября 2009 г. – СПб.: СПбГУ, ВВМ, 2009. – С.56-61.

Статьи в периодических изданиях

7. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Шевчук О.И. Изменчивость уровня Мирового океана за последние 140 лет // Учен. записки РГГМУ. 2007. Вып. 4. С. 125–131.

8. Малинин В.Н., Шевчук О.И. О возможных изменениях уровня мирового океана в ближайшие десятилетия // Общество. Среда. Развитие. 2009. №2. С. 172-180.

9. В.Н. Малинин, О.И. Шевчук. О прогнозе сезонного хода уровня Мирового океана // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2009. № 3 (5). С. 25-32.