

УДК [502.51:551.464.38](261.243)

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ФИНСКОГО ЗАЛИВА ПО ИНДИКАТОРАМ ЭВТРОФИРОВАНИЯ ХЕЛКОМ

А.А. Ершова¹, К.Д. Коробченкова¹, Ю.С. Агранова²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, ershova@rshu.ru

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Проведен анализ экологического состояния водной среды Финского залива по данным международного мониторинга. Проанализирована сезонная и межгодовая изменчивость таких индикаторов эвтрофирования водной среды Финского залива, как концентрация биогенных элементов, растворенного кислорода и хлорофилла *a*. Наблюдается значительное превышение установленных значений целевых индикаторов эвтрофирования ХЕЛКОМ для Финского залива в целом. При этом наблюдаются различия в изменчивости значений параметров для восточной и западной части Финского залива, отражающие, по-видимому, природные различия в морфометрических характеристиках и формировании гидрохимического и гидробиологического режима данных акваторий. Показано, что достижение «хорошего экологического статуса», определенного в Плане действий по Балтийскому морю, для Финского залива маловероятно.

Ключевые слова: индикаторы эвтрофирования, Финский залив, международный мониторинг.

ASSESSMENT OF THE STATE OF THE GULF OF FINLAND BASED ON HELCOM INDICATORS OF EUTROPHICATION

A.A. Ershova¹, K.D. Korobchenkova¹, Ju.S. Agranova²

¹ Russian State Hydrometeorological University

² Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

The environmental status of the Gulf of Finland water environment was analyzed on the basis of data of international monitoring. Seasonal and interannual variability of such indicators of eutrophication of aquatic environment of the Gulf of Finland as concentration of nutrients, dissolved oxygen and chlorophyll *a* has been analyzed. There is a general significant excess of the established values of the target HELCOM eutrophication indicators for the Gulf of Finland. At the same time, there are differences in the variability of the parameters for the eastern and western parts of the Gulf of Finland, reflecting, apparently, the natural differences in the morphometric characteristics and the formation of the hydrochemical and hydrobiological regime of these water areas. It was shown, that achievement of the “Good Environmental Status” defined in the Baltic Sea Action Plan according to the existing target indicators is unlikely for this water body.

Keywords: indicators of eutrophication, Gulf of Finland, international monitoring.

Введение

Финский залив, являющийся одной из наиболее эвтрофированных частей Балтийского моря, омывает берега трех стран: России, Финляндии и Эстонии [12]. Проблема эвтрофирования данной акватории связана как с природными особенностями залива (ограниченный водообмен с Центральной Балтикой, сезонная стратификация и др.), так и с сильной антропогенной нагрузкой на данную

экосистему (поступление биогенных элементов от сельскохозяйственных и муниципальных источников) [1, 9, 12, 15]. Несмотря на значительное снижение биогенной нагрузки от точечных источников в Санкт-Петербурге в последние годы после модернизации очистных сооружений города [2, 16], концентрация биогенных веществ в водах залива остается высокой [5, 14, 17]. Естественно, это сказывается на рекреационной привлекательности побережья города, особенно Курортного района [4].

План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю (ПДБМ) [11] определяет достижение так называемого «хорошего экологического статуса» («Good Environmental Status») для каждого суббассейна моря по целевым значениям ключевых индикаторов эвтрофирования [13], характеризующих соответствующие цели в Сегменте «Эвтрофикация» ПДБМ ХЕЛКОМ:

- летние значения прозрачности воды, измеренной диском Секки, отражающие экологическую цель «Чистая вода» — главную экологическую цель;
- зимние значения концентрации биогенов в поверхностном слое воды, отражающие экологическую цель «Концентрации биогенов, близкие к естественным уровням»;
- концентрация хлорофилла *a*, отражающая экологическую цель «Естественные уровни цветения водорослей»;
- диапазон глубины произрастания подводной растительности — отражает экологическую цель «Естественный ареал распространения растений и животных»;
- масштаб и продолжительность сезонного истощения кислорода — отражает экологическую цель «Естественные уровни кислорода».

Единые цели установлены для всей акватории Финского залива в целом, несмотря на значительные различия формирования биогенного и кислородного режима в его западной и восточной части. Таким образом, целью работы был анализ изменчивости некоторых индикаторов эвтрофирования в западной и восточной части Финского залива по данным международного мониторинга для выявления соответствия состояния морских вод экологическим целям ПДБМ.

Материалы и методы

Финский залив делится на две части — западную (принадлежащую Финляндии и Эстонии) и восточную (российские воды). Для анализа уровня эвтрофирования акватории Финского залива были использованы данные, полученные в ходе международного мониторинга в разные сезоны 2014 г. в рамках совместного проекта России, Финляндии и Эстонии «Год Финского залива — 2014» (рис. 1). Таким образом, впервые за последние годы появилась возможность в рамках данной работы подробно проанализировать сезонную изменчивость характеристик уровня эвтрофирования водной среды Финского залива.

С целью анализа изменчивости индикаторов эвтрофирования были выбраны двадцать станций мониторинга в восточной части Финского залива, а также станции на осевом разрезе ХЕЛКОМ. В качестве исследуемых показателей были выбраны концентрации растворенного кислорода, общего фосфора и общего азота,

Анализ изменчивости индикаторов эвтрофирования в Финском заливе в 2014 г.

Индикатор

«Масштаб и продолжительность сезонного истощения кислорода»

В течение года поверхностные воды Финского залива хорошо насыщены кислородом, однако в придонном слое начиная с мая происходит развитие гипоксической зоны, которая к августу достигает своих максимальных размеров в западной части залива: минимальная концентрация растворенного кислорода составляет 0,09 мл/л (ст. LL12, LL7, LL3A). Осенью за счет ветрового перемешивания и охлаждения водной толщи обширная гипоксическая зона уменьшается, но не исчезает. Таким образом, в придонном слое в западной части залива соблюдение цели ХЕЛКОМ «Естественные уровни кислорода» наблюдается только в январе. В восточной части Финского залива в силу его мелководности соблюдение целевого значения концентрации растворенного кислорода наблюдается в течение всего года, однако также отмечается формирование гипоксической зоны в районе глубоководной станции 4, которая исчезает только в октябре (рис. 2). В целом данная ситуация является типичной для рассматриваемой акватории: в глубоководных районах гипоксия отмечается в течение всего года, тогда как в восточной, мелководной части залива придонные слои обеднены кислородом только в летний период [3, 5—7].

Индикатор «Зимние концентрации биогенов в поверхностном слое воды»

Для сезонного распределения биогенных элементов (азота и фосфора) в Финском заливе характерно их накопление в придонных слоях, особенно в глубоководной части залива. Максимальные концентрации общего азота наблюдаются с июня по октябрь в российской части Финского залива (62,10 $\mu\text{моль/л}$) в районе Лужской, Копорской и Невской губы, что может быть обусловлено поступлением пресных и богатых биогенами речных вод. Наибольшее накопление фосфора происходит в глубоководной западной части залива, что соответствует развитию там гипоксических условий (рис. 3, 4). Здесь биогенный режим обусловлен внутренней нагрузкой на водоем, когда в условиях дефицита кислорода происходит дополнительное поступление соединений фосфора из донных осадков.

В поверхностном слое в летний период наблюдается низкое содержание азота и фосфора в связи с фотосинтетической активностью и сезонными пиками цветения микроводорослей. Поэтому ХЕЛКОМ установлены целевые значения уровня эвтрофирования в зимние месяцы, когда происходит накопление этих элементов в поверхностном слое (целевые значения концентрации общего фосфора $< 0,56 \mu\text{моль/л}$ и общего азота $< 22,15 \mu\text{моль/л}$, см. табл. 1). Анализ сезонной изменчивости этих характеристик показал, что в целом в Финском заливе не происходит соблюдения цели «Концентрации биогенов, близкие к естественным уровням»: отмечается превышение целевых значений в зимний период для общего фосфора (более чем в два раза в западной части залива) и для общего азота (в 1,5—2 раза на всем осевом разрезе) (рис. 5, 6).

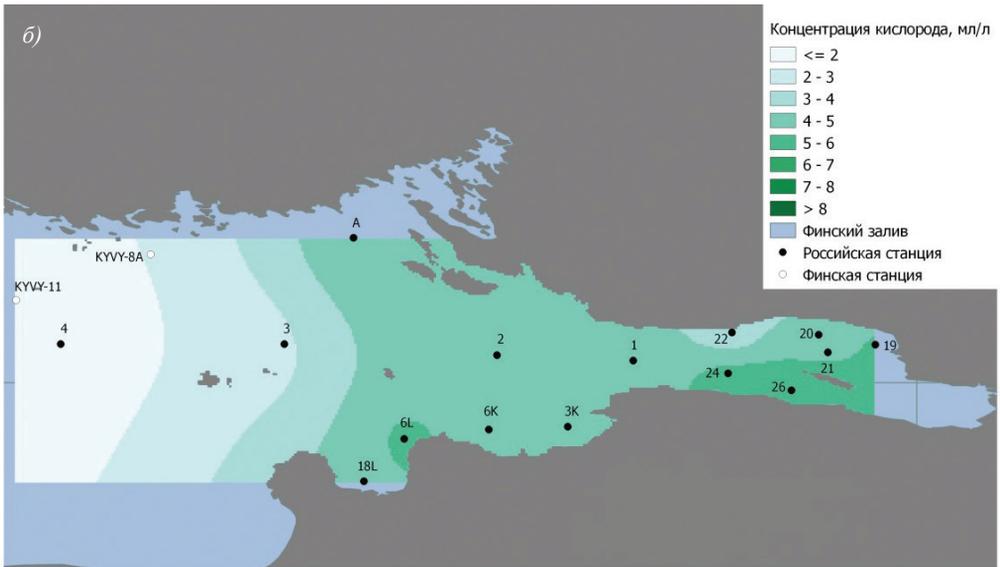
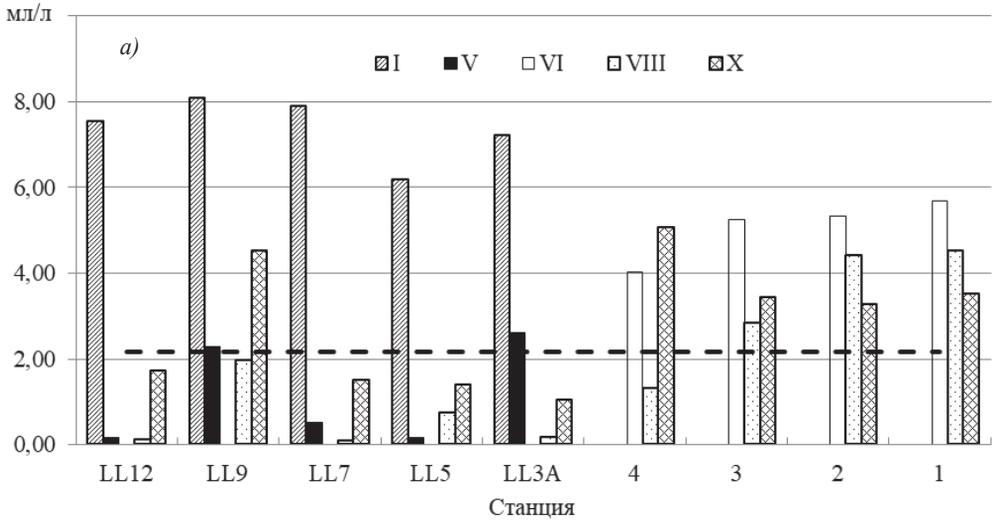


Рис. 2. Концентрация растворенного кислорода (мл/л) в придонном слое на осевом разрезе Финского залива в течение 2014 г. по месяцам (а) и в восточной части Финского залива в августе 2014 г. (б).

Штриховая прямая на рис. а — целевое значение ХЕЛКОМ.

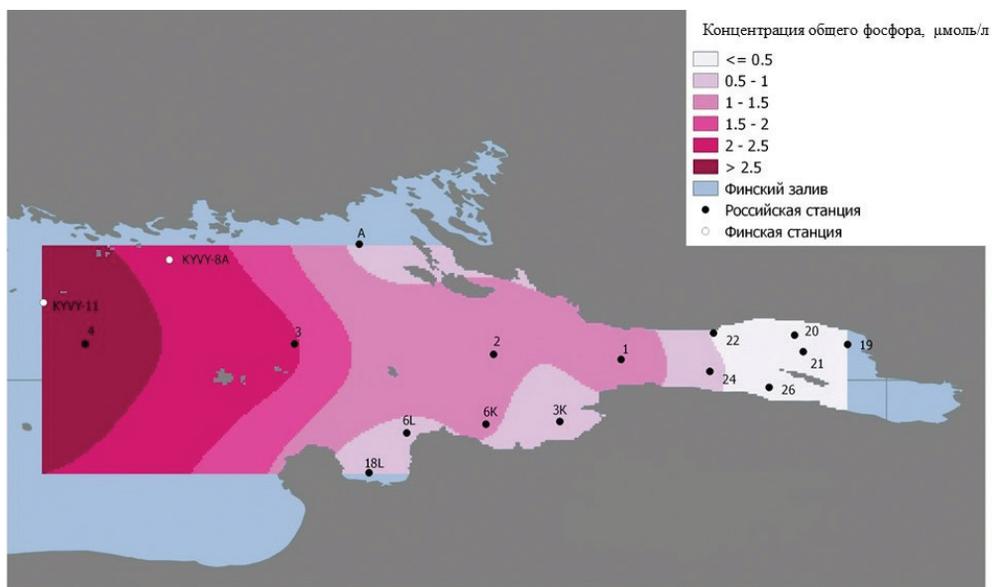


Рис. 3. Концентрация общего фосфора ($\mu\text{mol/L}$) в придонном слое восточной части Финского залива в августе 2014 г.

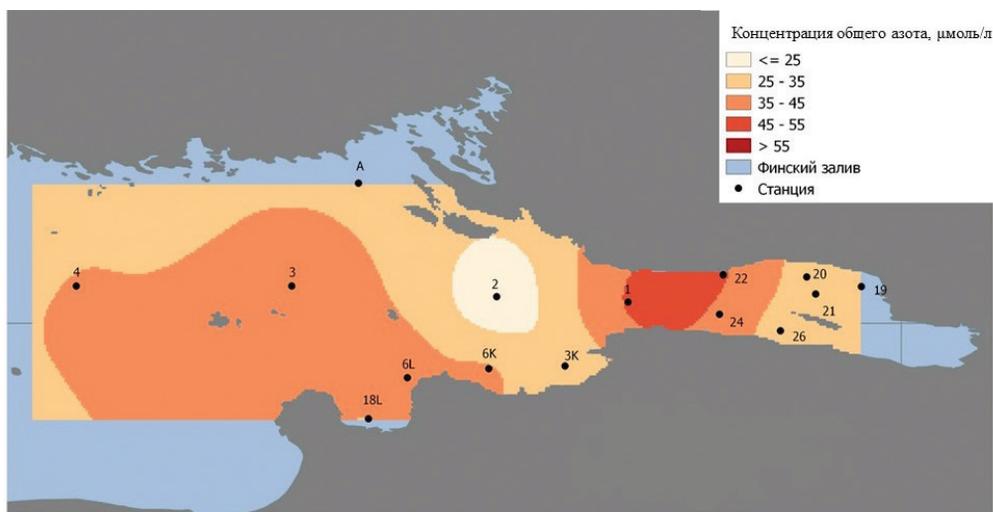


Рис. 4. Концентрация общего азота ($\mu\text{mol/L}$) в придонном слое в восточной части Финского залива в августе 2014 г.

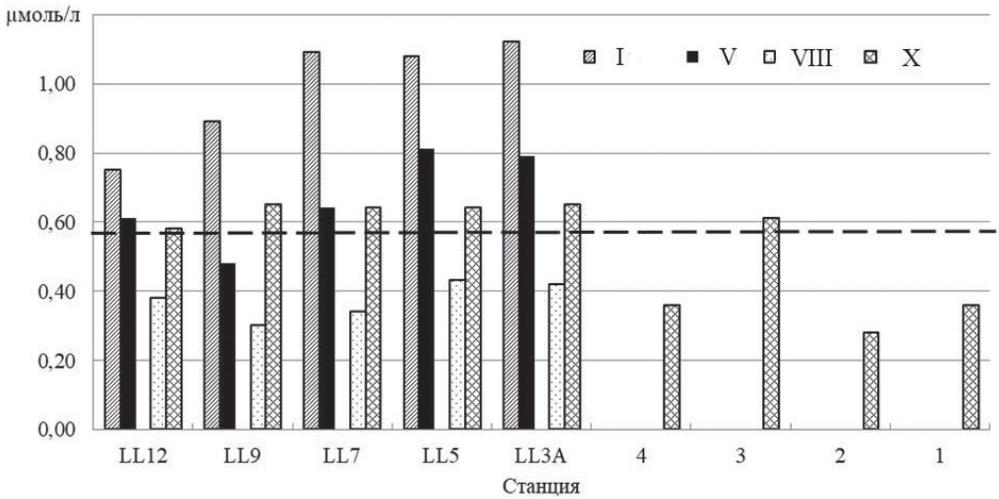


Рис. 5. Содержание общего фосфора ($\mu\text{моль/л}$) в поверхностном слое на осевом разрезе Финского залива в течение 2014 г. по месяцам.

Штриховая прямая — целевое значение ХЕЛКОМ.

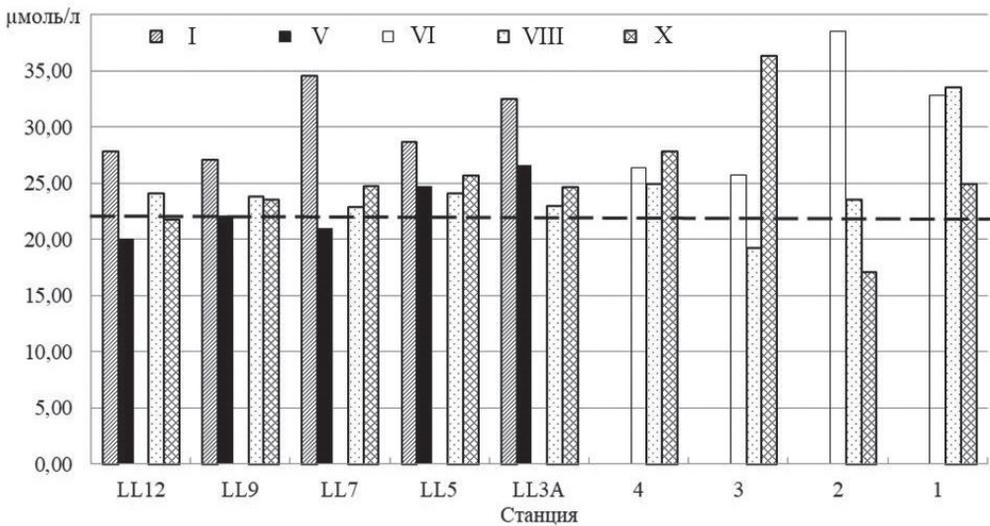


Рис. 6. Содержание общего азота ($\mu\text{моль/л}$) в поверхностном слое на осевом разрезе Финского залива в течение 2014 г. по месяцам.

Штриховая прямая — целевое значение ХЕЛКОМ.

Индикатор «Концентрация хлорофилла *a*»

Соблюдение экологической цели «Естественные уровни цветения водорослей» определялось по концентрации хлорофилла *a*. В мае на трех глубоководных станциях в западной части Финского залива значения концентрации хлорофилла *a* намного превышают среднегодовые значения. Таким результатам способствует пик цветения водорослей в данный период времени. Для данных за июнь и август был взят индикатор для летнего периода. Значительных отклонений летних значений от целевого в 2014 г. не отмечено, однако в течение всего периода концентрация хлорофилла *a* в Финском заливе близка к предельному значению (около 2 $\mu\text{г/л}$) (рис. 7).

Индикатор «Летняя прозрачность воды по диску Секки»

Соблюдения экологической цели «Чистая вода», для которой анализируется глубина прозрачности воды по диску Секки в летний период, в 2014 г. не отмечается практически ни на одной исследуемой станции. Наибольшие отклонения от целевого значения в 2014 г. наблюдаются в восточной части Финского залива (почти в два раза) (рис. 8), где происходит вынос большого количества взвешенных веществ в мелководный район с пресными водами реки Невы.

Известно, что прозрачность (мутность) воды в мелководной части акватории восточной части Финского залива в значительной степени определяется динамическими процессами перемешивания, и согласно данным многолетних наблюдений

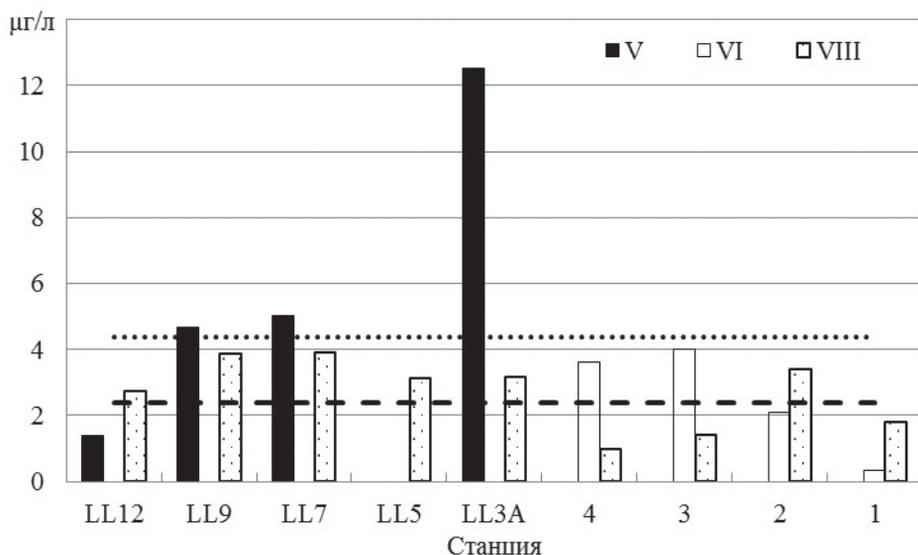


Рис. 7. Концентрация хлорофилла *a* ($\mu\text{г/л}$) в поверхностном слое воды на осевом разрезе Финского залива в течение 2014 г. по месяцам.

Пунктир — целевое значение ХЕЛКОМ за летний период,
штриховая прямая — целевое среднегодовое значение ХЕЛКОМ.

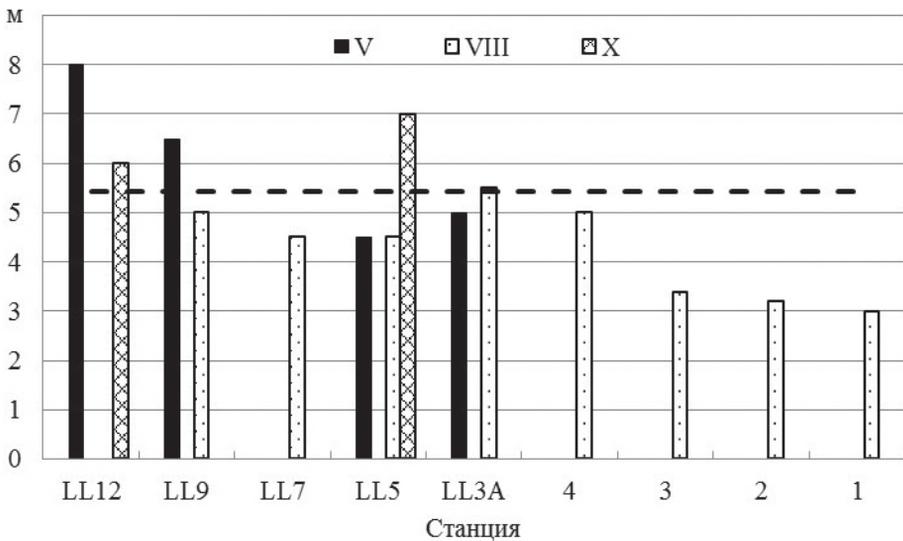


Рис. 8. Прозрачность по диску Секки (м) на осевом разрезе Финского залива в течение 2014 г. по месяцам. Штриховая прямая — целевое значение ХЕЛКОМ.

содержание взвешенных веществ в водах реки Невы значительно ниже, чем в самой Невской губе [1, 8, 9]. Кроме того, важнейшее значение имеют регулярно проводимые в данной акватории гидротехнические работы. Так, самые низкие значения прозрачности воды (менее 1 м) в восточной части Финского залива за последние десятилетия наблюдались в 2007—2008 гг. во время проведения масштабных дреджинговых работ в Невской губе, связанных со строительством в Санкт-Петербурге комплекса «Морской фасад». Тогда шлейф мутных вод наблюдался даже в глубоководном районе восточной части Финского залива [11].

Другим природным фактором, влияющим на глубину прозрачности в данном районе, является интенсивность «цветения» фитопланктона. В последние годы наблюдаются относительно высокие значения прозрачности в мелководном районе в связи с повышенными значениями солености морской воды, что является сдерживающим фактором развития местного доминанта фитопланктона — пресноводного *Planctotrix agardii*, плохо переносящего такие колебания солености (до 3,8 ‰) [14]. При этом глубина прозрачности по диску Секки в данном районе все равно остается ниже целевого значения ХЕЛКОМ.

Соответствие экологического статуса Финского залива целям ПДБМ ХЕЛКОМ

Проведение международного мониторинга в рамках проекта «Год Финского залива — 2014» позволило собрать и проанализировать ряд уникальных данных по сезонной изменчивости основных характеристик эвтрофирования водной

среды Финского залива. В целом отмечено несоблюдение экологических целей ПДБМ ХЕЛКОМ для всей акватории, причем наибольшие отклонения значений индикаторов от целевых значений наблюдались для концентрации растворенного кислорода у дна, зимней концентрации биогенных элементов на поверхности, а также для глубины прозрачности по диску Секки.

Согласно имеющимся данным мониторинга (с 1950-х годов) о многолетней изменчивости концентрации растворенного кислорода в придонном слое Финского залива [6, 12], достижение экологической цели ПДБМ «Естественные уровни кислорода» (целевое значение выше 2,17 мл/л) происходило только в короткий период с 1980-х по 1990-е годы, а изменение гидрохимического режима акватории было обусловлено влиянием природных факторов (затоки глубинных вод из Центральной Балтики, периоды стагнации, уменьшение стратификации) [3, 8, 9, 12]. Большую часть периода (с 1950-х годов) концентрация кислорода у дна была в Финском заливе практически неизменна и близка к нулю (рис. 9); данная тенденция сезонного истощения кислорода сохраняется и сегодня (рис. 10) [7, 8].

Отличие от концентрации кислорода зимние значения концентрации биогенных веществ в поверхностном слое (0—10 м) в период измерений (1970—2006 гг.) варьировали в широких пределах (рис. 11). При этом концентрация общего азота практически весь период наблюдений находилась в рамках экологической цели ПДБМ (22,15 $\mu\text{моль/л}$), хотя и наблюдалось постепенное повышение содержания азота с конца 1990-х годов. Можно говорить о сохранении тенденции повышения концентрации азота, так как уже в 2014 г. зафиксировано превышение данного целевого индикатора в среднем в 1,2—1,5 раза (30—35 $\mu\text{моль/л}$) с максимальными значениями в восточной части Финского залива.

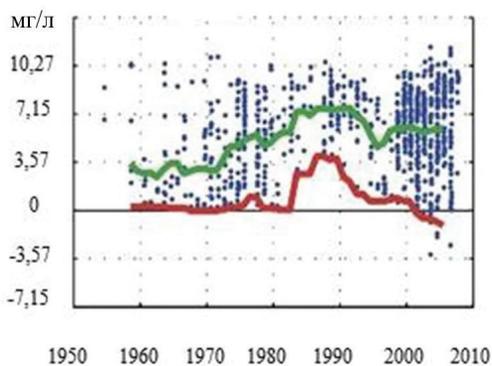


Рис. 9. Осенние значения концентрации растворенного кислорода у дна за период 1950—2006 гг. [11].

Верхняя кривая — 5-летнее среднее значение;
нижняя кривая — 5-летнее среднее значение от 25% минимальных значений.

Концентрация общего фосфора в течение всего периода наблюдений (с 1970-х годов [12]) значительно превышала целевое значение ХЕЛКОМ (зафиксированный в 2004 г. максимум составил 0,9 $\mu\text{моль/л}$) (см. рис. 11). При этом очевидна общая тенденция увеличения концентрации общего фосфора в поверхностных водах Финского залива в зимний период начиная с середины 1990-х годов. Эта тенденция наблюдается и в настоящее время: в 2014 г. целевое значение индикатора было превышено более чем в два раза (в западной части Финского залива значения превышали 1 $\mu\text{моль/л}$).

Анализ изменчивости таких индикаторов эвтрофирования, как концентрация хлорофилла *a* и прозрачность воды по диску Секки, также

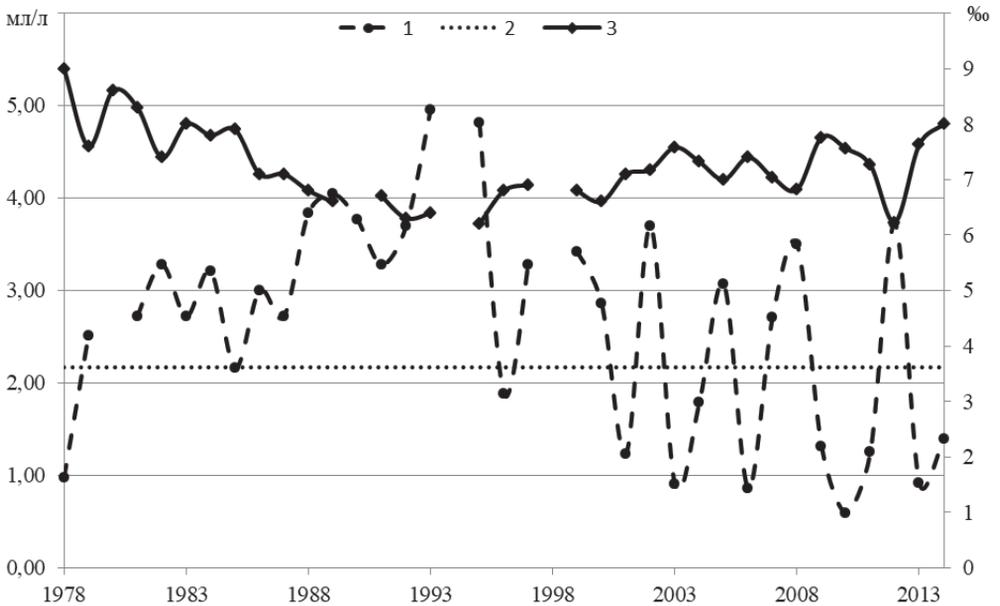


Рис. 10. Многолетняя изменчивость концентрации растворенного в воде кислорода (мл/л) на станции 4UGMS в глубоководной восточной части Финского залива в позднелетний период с 1978 по 2014 г. (по данным исследований РГГМУ [8] и литературным данным [7]).

1 — концентрация растворенного кислорода в воде, 2 — целевое значение ХЕЛКОМ, 3 — соленость.

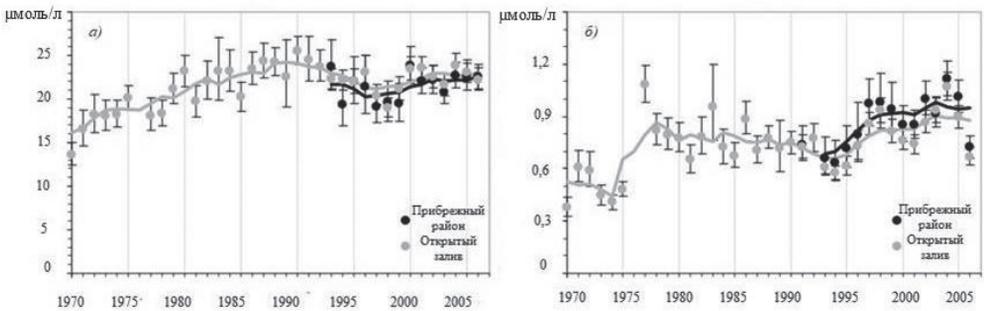


Рис. 11. Зимние (декабрь — январь) значения концентрации (μмоль/л) общего азота (а) и общего фосфора (б) в поверхностных водах (0—10 м) Финского залива в 1970—2006 гг. [12].

показал значительные отклонения от целевых значений ХЕЛКОМ. Несмотря на благоприятные природные (осолонение поверхностных вод) и антропогенные (уменьшение объема гидротехнических работ) условия в данной акватории в последние годы, значения показателей значительно превышают цели ПДБМ.

Заключение

Исследование показало, что основные экологические цели сегмента «Эвтрофикация» ПДБМ ХЕЛКОМ в настоящее время не соблюдаются на всей акватории Финского залива (по данным за 2014 г.). При этом отмечается значительная изменчивость в превышении целевых значений индикаторов эвтрофирования в восточной и западной части залива, что, по-видимому, отражает различия в морфометрических характеристиках и в формировании гидрохимического и гидробиологического режима в данных акваториях [7—9, 14]. Наибольшие отклонения от целевых индикаторов (в 1,5—2 раза) наблюдаются для концентраций растворенного кислорода, содержания общего фосфора и глубины прозрачности по диску Секки. Сравнение с данными многолетних наблюдений показало сохранение как общих тенденций повышения содержания биогенных элементов в поверхностном слое Финского залива в зимний период, так и сезонной гипоксии у дна.

С учетом сохраняющихся тенденций накопления биогенных элементов в данной акватории и сезонной придонной гипоксии можно сказать, что достижение «хорошего экологического статуса» в соответствии с действующими едиными для всего Финского залива «экологическими целями» ПДБМ маловероятно. Возможно, необходимо пересмотреть значения целевых индикаторов для двух разных частей Финского залива — восточной (мелководной) и западной (глубоководной) — с учетом природных различий этих акваторий.

Список литературы

1. Голубков С.М., Максимов А.А., Голубков М.С., Литвинчук Л.Ф. Функциональный сдвиг в экосистеме восточной части Финского залива под влиянием естественных и антропогенных факторов // Доклады РАН. 2010. Т.432, №3. С.423—425.
2. Еришова А.А. Комплексная оценка поступления биогенных веществ с водосбора реки Невы в восточную часть Финского залива / Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб, 2013. 28 с.
3. 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. 151 с.
4. Малинин В.Н., Митина, Ю.В., Шевчук, О.И. К оценке затопления побережья Курортного района Санкт-Петербурга при прохождении экстремальных наводненческих циклонов // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 29. С. 138—145.
5. Савчук О.П., Вулф Ф. Круговорот азота и фосфора в открытой Балтике / В кн.: Проект «Балтика». Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып.5. СПб: Гидрометеоиздат, 1997. С. 63—103.
6. Соловчук П.В., Кочеткова Е.С. Закономерности пространственного распределения растворенного кислорода в восточной части Финского залива / В сб.: Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана. Петрозаводск, 2011. С. 80—83.
7. Шатрова О.В., Ерёмкина Т.Р., Ланге Е.К. Анализ изменчивости параметров эвтрофирования в Финском заливе по данным натурных наблюдений // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 129—140.

8. *Шнаер И.С.* Режим фосфора в Восточной части Финского залива / В кн.: Проект «Балтика». Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып. 5. Экосистемные модели. Оценка современного состояния Финского залива. Ч. 2. СПб: Гидрометеоздат, 1997. С. 268—329.
9. Экосистема эстуария реки Нева: биологическое разнообразие и экологические проблемы / Под ред. А.Ф. Алимова, С.М. Голубкова. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 477 с.
10. *Eremina T., Khaimina O., Lange E., A.Maximov, A.Ershova.* Impact of hydraulic engineering activity on the Neva estuary and Eastern part of the Gulf of Finland ecosystem / Proc.the Baltic Sea Science Congress. Tallinn, Estonia. 2009. P. 222.
11. HELCOM 2007. Baltic Sea Action Plan. Helsinki: Helsinki Commission Publ., 2007. 103 p.
12. HELCOM 2009. Eutrophication in the Baltic Sea — An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment and eutrophication in the Baltic Sea region. Balt. Sea Environ. Proc. No. 115B. 148 p.
13. HELCOM 2013. Eutrophication in the Baltic Sea — Approaches and methods for eutrophication target setting in the Baltic Sea region // Baltic Sea Environ. Proc. № 133. 134 p.
14. *Kauppila K., T. Eremina, A. Ershova, A. Maximov, I. Lips, U. Lips, H. Alasalmi, S. Anttila, J. Attila, J.-E. Bruun, S. Kaitala, K. Kallio, V. Keto, H. Kuosa, H. Pitkänen, E. Lange.* Chlorophyll *a* and phytoplankton blooms / In: The Gulf of Finland Assessment / Ed. by: M. Raateoja and O. Setälä. Reports of the Finnish Environment Institute 27, 2016. P. 114—123.
15. *Pitkänen H.* Nutrient dynamics and conditions in the eastern Gulf of Finland: the regulatory role of the Neva estuary // Aqua Fennica, 1991. 21 (2). P. 105—115.
16. FSUE “Vodokanal of St. Petersburg” official web-page. “Protection of the Baltic Sea”. http://www.vodokanal.spb.ru/kanalizovanie/ekologiya_baltijskogo_morya/
17. *Raateoja M., Pitkänen H., Eremina T., et al.* Nutrients in the water / In: The Gulf of Finland Assessment / Ed. by: M. Raateoja and O. Setälä. Reports of the Finnish Environment Institute 27, 2016. P. 94—113.