



ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОТНОШЕНИЯ

Система комплексного мониторинга состояния морской среды Черного моря

Сергей А. Лебедев^а, Павел Н. Кравченко^б

^аГеофизический центр РАН, Москва, Россия; Майкопский государственный
технологический университет, Майкоп, Россия,

s.lebedev@gcras.ru

^бТверской государственный университет, Тверь, Россия

kravchenko.pn@tversu.ru

Аннотация: Создание системы комплексного мониторинга состояния морской среды Черного моря на базе спутниковых данных и прогноза ее состояния на базе современных совместных моделей циркуляции моря и атмосферы с усвоением данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) и натурных измерений является откликом на современные потребности общества. Она будет способствовать предотвращению и своевременному реагированию на кризисы, обусловленные естественными и техногенными рисками. Созданная система будет решать задачи обеспечения и повышения национальной безопасности, повышения качества жизни людей, развития новых наукоемких отраслей экономики.

Ключевые слова: мониторинг, прогноз, дистанционное зондирование, Черное море

Для цитирования: Лебедев С.А., Кравченко П.Н. Система комплексного мониторинга состояния морской среды Черного моря. *Проблемы постсоветского пространства*. 2019;6(3):269-278. DOI: <https://doi.org/10.24975/2313-8920-2019-6-3-269-278>

Статья поступила: 14.05.2019

Принята в печать: 14.05.2019

Опубликована: 17.09.2019

The Complex Monitoring System of the Black Sea Marine Environment State

Sergey A. Lebedev^а, Pavel N. Kravchenko^б,

^аGeophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
Maykop State Technological University, Maykop, Russia

s.lebedev@gcras.ru

^бTver State University, Tver, Russia

kravchenko.pn@tversu.ru

Abstract: Development of the complex monitoring and forecasting system of the Black Sea marine environment state based on remote sensing data and modern joint sea and atmosphere circulation models of with the assimilation of remote sensing data and in-situ measurements is a response to modern society needs. It will contribute to the prevention and timely response to crises caused by natural and technogenic risks. The created system will solve the problems of ensuring and enhancing national security, improving of the people life quality, and developing new high-tech sectors of the economy.

Keywords: monitoring, forecasting, remote sensing, Black Sea

For citation: Lebedev S.A., Kravchenko P.N. The Complex Monitoring System of the Black Sea Marine Environment State. *Post-Soviet Issues*. 2019;6(3):269-278. DOI: <https://doi.org/10.24975/2313-8920-2019-6-3-269-278>

Received 14.05.2019

Revised 14.05.2019

Published 17.09.2019

ВВЕДЕНИЕ

Экологическое состояние морей России вызывает обоснованную озабоченность специалистов [1, 2]. Это обусловлено многими причинами.

За последние время в Черном море произошло расширение деятельности нефтегазовой отрасли по транспортировке и экспорту углеводородов и других грузов через порты России, что вызвало строительство новых нефтеналивных терминалов и увеличение интенсивности судоходства, в том числе движения танкеров. Это приводит к увеличению рисков загрязнения окружающей среды нефтепродуктами в результате «хронического» загрязнения морей и аварий судов. Судоходство, включая транспортировку и перевалку нефти на терминалах, оказывает основное негативное влияние на морскую окружающую среду и береговую зону морей, что является причиной 45% нефтяного загрязнения океана [3, 4].

Помимо нефтяного загрязнения в Черное море поступают взвешенные вещества производственной деятельности на акватории

моря и на берегу: прокладки трубопроводов, кабелей, дампинга, взрывов на дне и пр. Большое количество взвешенного вещества прибывает со стоком рек, в результате выноса вод из заливов, образуется в результате вертикального перемешивания при сильном волнении на мелководье. Все это приводит к вторичному загрязнению вод, увеличению мутности, снижению фотоактивной радиации, биопродуктивности, изменению структуры популяций, гибели бентоса [5].

В результате эвтрофикации вод (обогащение морей биогенами) и регионального изменения климата в ряде морей России начали происходить процессы, приводящие к аномальному цветению вод в тех районах, где это ранее не наблюдалось. Эвтрофикация поверхностных вод окраинных и внутренних морей, объясняемая главным образом избытком питательных веществ (фосфора и азота), является важной проблемой, которая с каждым годом становится острее. Бурное цветение сине-зеленых водорослей (многие из них токсичны) с каждым

годом охватывает все большие площади северо-западного шельфа Черного моря [6].

В начале 1990-х гг. кардинально изменилась геополитическая обстановка в Черном море. В связи с распадом СССР на берегах этих морей появились новые независимые государства. Практически полностью прекратился обмен данными с бывшими советскими республиками, скоординированных работ в море не проводится, а на работы в территориальных водах сопредельных государств требуется получение специальных разрешений. За последние 30 лет значительно уменьшился объем регулярных гидрологических работ в море, проводимых различными научными организациями России, а также объем информации с метеостанций и уровненых постов Росгидромета. Так, например, в начале 1990-х гг. регулярный авиационный контроль нефтяных загрязнений морей России практически прекратился, а в Черном море не проводился никогда.

В настоящее время никак не учитывается загрязнение морей России в результате трансграничного переноса течениями с акваторий сопредельных государств, и наоборот — вод сопредельных государств с акваторий России. Такая проблема в явном виде существует в Черном море. Следовательно, организация комплексного спутникового мониторинга морей России и, в частности Черного моря, стала еще более актуальной задачей.

ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Спутниковые методы давно, широко и активно используются для мониторинга Мирового океана и в настоящее время играют важную роль в создаваемой Глобальной системе наблюдения за океаном (ГСНО) [7, 8]. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обладают большими возмож-

ностями и преимуществами по сравнению с наземными средствами наблюдений:

- глобальное покрытие земного шара;
- мгновенная съемка обширных акваторий;
- наивысшая оперативность в получении данных;
- возможность ежедневного повтора наблюдений;
- высокое пространственное разрешение (от 1 км до 50 см);
- получение комплексных и мультисенсорных данных;
- возможность организации оперативного комплексного мониторинга в любой точке Мирового океана;
- использование тех же спутниковых данных для решения широкого круга вспомогательных и дополнительных задач мониторинга суши (пожары, наводнения, опустынивание, вегетация, водные ресурсы и пр.);
- существенно более низкая стоимость спутникового мониторинга по сравнению с морскими наблюдениями.

Данные ДЗЗ наряду с анализом гидрологических данных позволяют с высоким пространственно-временным разрешением регулярно получать необходимые термодинамические, оптические и метеорологические параметры одновременно на всей акватории Черного моря, а не только в его российском секторе.

В настоящее время на орбите функционирует большая группировка специализированных спутников ДЗЗ с научной аппаратурой на борту, работающей в разных диапазонах электромагнитного спектра (инфракрасный, видимый, микроволновый диапазоны).

Точность и разрешающая способность современных приборов постоянно растёт, и одновременно расширяется набор параметров, характеризующих состояние океа-

Таблица 1. Поля и явления Мирового океана, исследуемые методами ДЗЗ

Поля и явления Мирового океана	Параметры и характеристики	Датчик
температура поверхности океанов и морей	температура	ИК радиометр, СВЧ радиометр
соленость поверхности океанов и морей	соленость	СВЧ радиометр
уровень моря	аномалии поля уровня, колебания уровня	альтиметр
приводный ветер	скорость и/или направление ветра	скаттерометр, СВЧ радиометр, альтиметр, радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА)
морские льды	распространение, положение кромки, толщина, возраст, сплоченность, скорость и направление дрейфа льдов и т.п.	ИК радиометр, СВЧ радиометр, РСА, альтиметр, спектрометрический радиометр видимого диапазона
состояние поверхности моря, волнение	длина, высота и направление распространения поверхностных волн	РСА, СВЧ радиометр, альтиметр
цвет воды, биопродуктивность, прозрачность	цвет воды, концентрация хлорофилла, фитопланктона, концентрация взвеси	спектрометрический радиометр видимого диапазона
морские течения, динамика водных масс, фронтальные зоны	скорость и направление течения, морфологическая структура, градиент температуры	ИК радиометр, РСА, альтиметр, спектрометрический радиометр видимого диапазона
мезо/мелкомасштабные явления на морской поверхности	вихри, проявление внутренних волн,	ИК радиометр, спектрометрический радиометр видимого диапазона, РСА
загрязнение нефтяными углеводородами и поверхностно активными веществами	цвет воды, ослабление поверхностных капиллярных волн	ИК радиометр, РСА

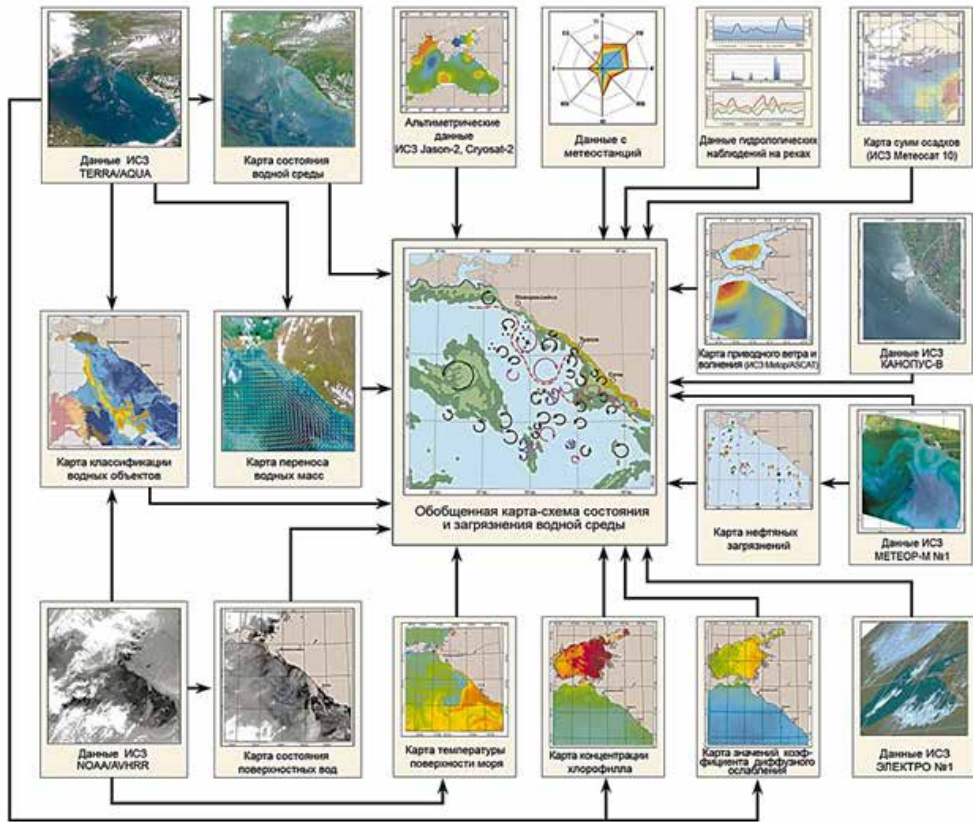


Рис. 1. Технология спутникового мониторинга состояния и загрязнения водной среды российского сектора Черного моря [9].

нов и морей, которые могут быть измерены из космоса (таблица 1).

Методами обработки данных ДЗЗ и использованием их в научных исследованиях состояния Черного моря занимаются ведущие ученые Морского гидрофизического института (МГИ) РАН, Института космических исследований РАН, Института океанологии (ИО) им. П.П. Ширшова РАН, Геофизического центра РАН, Государственного океанографического института (ГОИН) им. Н. Н. Зубова и многих других институтов Минобрнауки и Роскомгидромета.

Благодаря прогрессу в технологиях ДЗЗ из космоса стало возможным исследование различных типов мезо- и мелкомасштабных вихрей и струй, представляющих собой не только механизм переноса загрязнений, но и эффективный процесс «самоочищения» прибрежных вод от загрязнений различной природы, а также механизма переноса вод, нитратов и планктона из прибрежных зон в сторону открытого океана (моря), значительно влияющий на биопродуктивность удаленных от берега районов [1, 2].

Разработанная Научно-исследовательским центром «Планета» Росгидромета

технология оперативного спутникового мониторинга позволяет:

- проводить картографирование динамических характеристик и параметров загрязнения водной среды
- выявить основные особенности загрязнения морской среды, связанные с распространением внутриводных взвесей, развитием фитопланктона и водорослей, судовыми сбросами нефтепродуктов и др.;
- оценить влияние динамических структур в прибрежной зоне моря на пространственно-временное распределение основных параметров загрязнения морской среды, а также их вклада в механизмы очищения и самоочищения вод [9, 10].

Спутниковый мониторинг подтвердил, что специфика внутримассового загрязнения вод прибрежной зоны Черного моря во многом зависит от воздействия на морскую среду гидрометеорологических процессов, характеризующихся широким многообразием форм, масштабов и времени существования.

Многолетний спутниковый мониторинг позволит выявить и проанализировать типовые ситуации распределения загрязнений в прибрежных водах, определять новые элементы циркуляции вод, осуществляющие перенос загрязняющих веществ и очищение от них водной среды. Так, например, впервые по космическим данным было установлено, что вклад мелкомасштабной циркуляции вод российского сектора Черного моря в перенос и распределение загрязняющих веществ соизмерим с вкладом, вносимым основным черноморским течением и прибрежными антициклоническими вихрями. Выявленные закономерности динамики распределения загрязнений способствуют повышению достоверности картографирования экологической обстановки, в том числе прогнозирования динамики распространения загрязнений [10].

Дальнейшее развитие технологий спутникового мониторинга может осуществляться для решения задач оценки трансграничного обмена загрязняющих веществ в объеме прибрежной зоны северо-восточной части Черного моря, синхронизации программ оперативных наблюдений гидрометеорологической обстановки и спутникового мониторинга, совершенствования методических подходов к тематической обработке спутниковых данных [9].

ОПЕРАТИВНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

С развитием средств ДЗЗ перспектива реализации ГСНО стала реальностью, сложились предпосылки для создания современных систем гидродинамических прогнозов Мирового океана, аналогичных атмосферным прогнозам погоды. Развитие интегрированных оперативных систем наблюдений и морских прогнозов является предметом оперативной океанографии — новой ветви океанологической науки.

Формирование оперативной океанографии как раздела науки неразрывно связано с открытием интенсивной синоптической изменчивости открытого океана, показавшим, что текущее состояние океана значительно отличается от средноклиматического. Поэтому для эффективного обеспечения потребностей человеческой деятельности необходимо создавать средства непрерывного мониторинга состояния морской среды и развивать методы прогноза ее изменений.

Актуальные исследования в области оперативной океанографии требуют проведения огромного количества вычислительных экспериментов с использованием комплекса моделей циркуляции океана разной сложности: негидростатических моделей высокого разрешения; совместных модели циркуляции океана и атмосферы,

циркуляции и волнения; моделей, описывающих взаимодействие прибрежной зоны и открытого океана. Модели должны обладать высокой производительностью и быть частью единого информационно-вычислительного комплекса (ИВК) включающего базы данных как атмосферного воздействия, так и океанографических наблюдений, необходимых для инициализации моделей, их калибровки и оценки адекватности. ИВК должны быть оснащены развитым аппаратом обработки расчетов, алгоритмами ассимиляции данных наблюдений, позволяющими выявлять неадекватности физического содержания моделей и указывать пути их дальнейшего совершенствования [11].

В проектах Рамочных программ Европейской Комиссии в МГИ РАН была создана пилотная версия системы диагноза и прогноза Черного моря. Система основана на ассимиляции спутниковых измерений температуры поверхности моря и топографии морской поверхности и производит пятидневные прогнозы трехмерных полей температуры, солёности и скорости течений. Отдельные модули системы диагноза и прогноза полей Черного моря могут стать основой построения ИВК, необходимого для дальнейшего совершенствования методов моделирования и систем оперативных морских прогнозов [12].

В Институте вычислительной математики (ИВМ) им. Г.И. Марчука РАН создана Информационно-вычислительная система (ИВС) «ИВМ РАН — Чёрное море» с возможностью ассимиляции данных наблюдений температуры поверхности Чёрного и Азовского морей, данных о среднегодовых значениях уровня, с использованием или без использования приливообразующих сил и с реализацией распараллеливания численной модели циркуляции. ИВС позволяет рассчитать и проанализировать

основные характеристики (поля температуры, солёности, циркуляции, уровня) Чёрного и Азовского морей [13]. Однако данная система не работает в оперативном режиме.

В ГОИН реализована совместная оперативная модель циркуляции Черного и Азовского морей и региональная модель циркуляции атмосферы [14]

Таким образом, в настоящее время отсутствует единый центр прогнозирования полей Черного моря.

В 2017 г. сделан первый шаг в построении описанной выше трёхуровневой системы. Российский научный фонд (РНФ) поддержал предложение коллектива специалистов МГИ РАН, ИВМ РАН, ИО РАН и Гидрометцентра России о создании макета современной системы оперативного прогноза морской погоды в Мировом океане, Арктическом и Азово-Черноморском бассейнах в рамках проекта «Новые методы и суперкомпьютерные технологии анализа и прогноза Мирового океана и Арктического бассейна». В основу разработки системы положены новые суперкомпьютерные технологии решения задач численного моделирования циркуляции вод морских бассейнов с разрешением синоптических процессов. Макет системы будет реализован на кластере, имеющем более 650 ядер. Архитектура системы позволит управлять большими объёмами данных, обеспечивая их накопление, хранение и обработку.

Высокое качество прогнозов будет достигнуто за счёт ассимиляции в численных прогностических моделях доступных данных ДЗЗ и контактных наблюдений. Для подготовки анализов и прогнозов планируется использовать данные оперативного метеорологического прогноза Гидрометцентра России. Специальный блок системы будет проводить валидацию анализов и прогнозов посредством сопоставления с натурными данными и данными ДЗЗ.

Архитектура создаваемого макета системы базируется на структуре Черноморского центра мониторинга и прогноза МГИ РАН и будет соответствовать общеевропейским стандартам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание системы комплексного мониторинга состояния морской среды Черного моря на базе спутниковых данных и прогноза ее состояния на базе современных совместных моделей циркуляции моря и атмосферы с усвоением данных ДЗЗ

и натуральных измерений является откликом на современные потребности общества. Она будет способствовать предотвращению и своевременному реагированию на кризисы, обусловленные естественными и техногенными рисками. Созданная система будет решать задачи обеспечения и повышения национальной безопасности, повышения качества жизни людей, развития новых наукоемких отраслей экономики.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГЦ РАН, утвержденного Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. *Комплексный спутниковый мониторинг морей России*. Москва: ИКИ РАН; 2011. С. 470.
2. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. *Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий*. Москва: ИКИ РАН; 2016. С. 262.
3. Патин С.А. *Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы*. Москва: ВНИРО; 2008. С. 508.
4. Израэль Ю.А., Цыбань А.В. *Антропогенная экология океана*. Москва: Флинта, Наука; 2009. С. 532.
5. Романкевич Е.А., Айбулатов Н.А. Химическое состояние морей России и здоровье человека. *Вестник отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук Российской академии наук, электронный научно-информационный журнал*. 2004;1(22): 1-16.
6. Нестерова Д.А. Итоги и перспективы исследований фитопланктона Северо-Западной части Черного моря. *Экология моря*. 2003;63:53-59.
7. Бубынин М.Д., Горлов В.А., Толкачев А.Я. Анализ существующих международных систем наблюдений в Мировом океане и перспектив их развития на основе применения современных технических средств наблюдений. *Инноватика и экспертиза*. 2013;2(11):116-127.
8. Никитин О.П. Международные программы глобальных океанографических наблюдений и участие в них России. *Океанологические исследования*. 2017; 45(1):70-89. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).7.
9. Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Островский А.Г. Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003-2007 гг. *Метеорология и гидрология*. 2007;11:5-13.
10. Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Островский А.Г. Космический мониторинг загрязнения российского сектора Азово-Черноморского бассейна в 2008 г. *Метеорология и гидрология*. 2009;3:5-19.
11. Марчук Г.И., Патон Б.Е., Кортаев Г.К., Залесный В.Б. Информационно-вычислительные технологии — новый этап развития оперативной океанографии. *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013;49(6):629-642. DOI: 10.7868/S0002351513060114.

12. Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeev V.L., Demyshev S.G., Kubryakov A.I., Ratner Y.B. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system. *Ocean Science*. 2011;7:629-649. DOI: 10.5194/os-7-629-2011.
13. Агошков В.И., Асеев Н.А., Гиниатулин С.В., Залесный В.Б., Захарова Н.Б., Пармузин Е.И. Информационно-вычислительная система «ИВМ РАН — Черное море». Москва: ИВМ РАН; 2016. С. 137.
14. Коршенко Е.А., Дианский Н.А., Фомин В.В. Воспроизведение глубоководной циркуляции Черного моря с помощью модели INMOM и сопоставление результатов с данными буев ARGO. *Морской гидрофизический журнал*. 2019;35(3):220-232. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-3-220-232.

REFERENCES

1. Lavrova O.Yu., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A. [Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas] Moscow: Space Research Institute RAS Publishing; 2011. С. 470. (In Russ.)
2. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Kostianoy A.G. [Satellite Methods for Detecting and Monitoring Marine Zones of Ecological Risk] Moscow: Space Research Institute RAS Publishing; 2016. С. 262. (In Russ.)
3. Patin S.A. [Oil spills and their impact on the marine environment and living sources] Moscow: VNIRO Publishing; 2008. С. 508. (In Russ.)
4. Israel Yu.A., Tsyban A.V. [Ocean Anthropogenic Ecology] Moscow: Flint Publishing House, Nauka; 2009. С. 532. (In Russ.)
5. Romankevich E.A., Aibulatov N.A. The impact of Russian seas on public health. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2005;75(1):31-39. (In Russ.)
6. Nesterova D.A. [Results and perspectives of studies of the northwestern Black Sea phytoplankton] *Ekologiya morya*. 2003;63:53-59. (In Russ.)
7. Bubinin M.D., Gorlov V.A., Tolkachev A.Y. [Analysis of the existing international observation systems of the World Ocean and perspectives of their development on the basis of application of modern technological means of observation] *Innovatika i ekspertiza*. 2013;2(11):116-127. (In Russ.)
8. Nikitin O.P. [International programs of global oceanographic observations and Russia's participation in them] *Okeanologicheskiye issledovaniya*. 2017;45(1):70-89. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).7. (In Russ.)
9. Bedritskii A.I., Asmus V.V., Krovotyntsev V.A., Lavrova O.Yu., Ostrovskii A.G. Satellite monitoring of pollution in the Russian sector of the Azov and Black Seas in 2003-2007. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2007;32(11):669-674. DOI: 10.3103/S1068373907110015. (In Russ.)
10. Bedritskii A.I., Asmus V.V., Krovotyntsev V.A., Lavrova O.Y., Ostrovskii, A.G. Space monitoring of pollution of the Russian sector of the Azov-Black Sea basin in 2008. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2009; 34(3): 137-147. DOI: 10.3103/S1068373909030017. (In Russ.)
11. Marchuk G.I., Paton B.E., Korotaev G.K., Zalesny V.B. Data-computing technologies: A new stage in the development of operational oceanography. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013;49(6):579-591. DOI: 10.1134/S000143381306011X. (In Russ.)
12. Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeev V.L., Demyshev S.G., Kubryakov A.I., Ratner Y.B. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system. *Ocean Science*. 2011;7:629-649. DOI: 10.5194/os-7-629-2011.
13. Agoshkov V.I., Aseev N.A., Giniatulin S.V., Zalesny V.B., Zakharova N.B., Parmuzin E.I. [Information and Computing System "INM

- RAS — Black Sea*"]. Moscow: Institute of Numerical Mathematics RAS Publishing; 2016. С. 137. (In Russ.)
14. Korshenko E.A., Diansky N.A., Fomin V.V. [Reconstruction of the Black Sea Deep-Water Circulation Using INMOM and Comparison of the Results with the ARGO Buoys Data] *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*. 2019;35(3);220-232. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-3-220-232. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Сергей А. Лебедев, доктор физико-математических наук, Геофизический центр РАН, Москва, Россия; 119296, Москва, Россия, ул. Молодежная, 3; Майкопский государственный технологический университет, Майкоп, Россия; 385000, Майкоп, Россия, ул. Первомайская, 191;

s.lebedev@gcras.ru

Павел Н. Кравченко, кандидат географических наук, Тверской государственный университет, Тверь, Россия; 170100, Тверь, Россия, ул. Желябова, 33;

kravchenko.pn@tversu.ru

Sergey A. Lebedev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; 119296, Moscow, Russia, Str. Molodezhnaya, 3; Maykop State Technological University, Maykop, Russia; 385000, Maykop, Russia, Str. Pervomayskaya, 191;

s.lebedev@gcras.ru

Pavel N. Kravchenko, Candidate of Geographical Sciences, Tver State University, Tver, Russia; bld. 33, Str. Zhelyabova, Tver, 170100, Russia;

kravchenko.pn@tversu.ru