

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СВИНЦОМ МОРЕЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РФ ПРИ ПОМОЩИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА¹

*А.Ю. Кожевников**, *Е.А. Варакин**, *И.С. Майоров**, *И.А. Кузнецова***, *Н.С. Ларионов***

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
(г. Архангельск)

**Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН
(г. Архангельск)

Богатый ресурсный потенциал Арктического региона и связанная с его освоением нагрузка на экосистемы делают необходимым создание эффективного инструмента по сбору и обработке растущего количества данных экологического мониторинга. Структура и широкий функционал разработанного авторами экспериментального аппаратно-программного комплекса обеспечивают обработку и наглядное представление большого массива данных об экологическом состоянии морей западного сектора Арктической зоны РФ, что является составляющей информационного обеспечения принципа сохранения благоприятной экологической среды для реализации особого национального интереса РФ – устойчивого развития Российской Арктики. Использование экспериментального аппаратно-программного комплекса показало, что моря Российской Арктики сохраняют относительно низкий уровень антропогенного загрязнения свинцом: средняя концентрация свинца составила $(3,13 \pm 1,70)$ мкг/дм³, т. е. 0,3 ПДК свинца в воде объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, установленной гигиеническим законодательством РФ. Содержание свинца в водах Белого моря, наиболее подверженного антропогенному воздействию, составило 0,6 ПДК. Долговременное антропогенное влияние на морскую среду Арктики на данном этапе имеет локальный характер с формированием очагов техногенного загрязнения в приустьевых областях крупных

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по теме «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной арктической зоне Российской Федерации» (соглашение о предоставлении субсидии от 20.10.2014 года № 14.610.21.0006, уникальный идентификатор ПНИЭР/FMEFI61014X0006) с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова.

Контактное лицо: Кожевников Александр Юрьевич, *адрес:* 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; *e-mail:* a.kozhevnikov@narfu.ru

Для цитирования: Кожевников А.Ю., Варакин Е.А., Майоров И.С., Кузнецова И.А., Ларионов Н.С. Экологический мониторинг загрязнения свинцом морей Арктической зоны РФ при помощи экспериментального аппаратно-программного комплекса // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 2. С. 71–78. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.2.71

рек и зонах портовой инфраструктуры. При этом поступление тяжелых металлов с речными водами крупных рек (например, р. Северной Двины) невелико, поскольку их большая протяженность обеспечивает эффективную работу естественного маргинального фильтра.

Ключевые слова: моря Арктической зоны РФ, экологический мониторинг морских вод, автоматизация экологического мониторинга, визуализация данных экологического мониторинга.

Особые национальные интересы Российской Федерации в Арктике охватывают прежде всего сферы политики и обороны (например, размещение и действие морских стратегических ядерных сил [1]), экономики и экологии (освоение и рациональное использование природных ресурсов [2], имеющих важное стратегическое значение в вопросах обеспечения страны как продовольствием [1], так и редкими полезными ископаемыми [3]). Одним из основных субъектов деятельности по защите и реализации национальных интересов РФ в морях Арктического региона является научно-технический комплекс по исследованию океанов и морей, обеспечивающий устойчивое гармоничное развитие региона [1], в т. ч. сохранение благоприятной экологической среды [4].

Сохранению благоприятной экологической среды Арктического региона угрожают следующие факторы:

1) локальные – разрабатываемые и эксплуатируемые нефтяные месторождения; арктическая транспортная система [5]; устаревшее коммунальное хозяйство поселений и городов в наиболее заселенной части Арктики [6] и др.;

2) трансграничные – воздушные потоки (главный фактор привноса ртути в Арктику); наземно-пресноводные пути – речной сток (например, поступление цинка), таяние льдов; океанические пути (океанские течения) [7]).

В связи с тем, что арктические территории считаются малозагрязненными, для выявления антропогенного воздействия лучше всего подходит изучение содержания свинца, как антропогенного элемента, поступающего в окружающую среду в наибольших объемах [7]. Цель данного исследования – выявление источников загрязнения свинцом морей Российской Арктики с использованием функционала разработанного авторами экспериментального аппаратно-программного комплекса (ЭАПК).

Материалы и методы. Пробы морской воды (всего 1156) отбирали в ходе комплексных научно-образовательных экспедиций «Арктический плавучий университет» 2012–2015 годов в соответствии с ГОСТ 17.1.5.05–85², ГОСТ 17.1.3.08–82³, ГОСТ 31861–2012⁴ по маршруту судна. Для определения содержания свинца в пробах использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр полного внешнего отражения («S2 Picofox», Германия) с применением специальной методики предварительного концентрирования и определения тяжелых металлов в морских водах [8], позволяющей проводить одновременное измерение концентрации 7 тяжелых металлов в морской воде. Каждое измерение осуществляли в двух повторностях с расчетом среднего арифметического значения и среднеквадратического отклонения, которое во всех случаях не превышало 10 %.

²ГОСТ 17.1.5.05–85. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. Введ. 1986–07–01. Доступ из справ. системы «NormaCS».

³ГОСТ 17.1.3.08–82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества морских вод. Введ. 1983–01–01. Там же.

⁴ГОСТ 31861–2012. Вода. Общие требования к отбору проб. Введ. 2014–01–01. Там же.

Построение моделей пространственных переменных на примере содержания свинца в природных водах производили при помощи ЭАПК, разработанного в рамках проекта «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной арктической зоне Российской Федерации», и сформированной в ходе экспедиций базы данных о состоянии морской среды, с применением алгоритмов средневзвешенной интерполяции значений концентраций. Функциональные модули ЭАПК (управления; визуализации и управления режима-

ми отображения выходных данных; управления обработкой и хранением усвоенной информации; представления данных в геоинформационной системе «ArcView 10.1») осуществляют автоматизированные процедуры обмена информацией между собой с помощью специального программного обеспечения, разработанного в среде «Microsoft Visual Studio 2012» [9].

Результаты и обсуждение. На гидрологический режим арктических морей влияют сток сибирских рек и водообмен с Центральным Арктическим бассейном, с Атлантическим и Тихим океанами (рис. 1) [10]. Основное внешнее

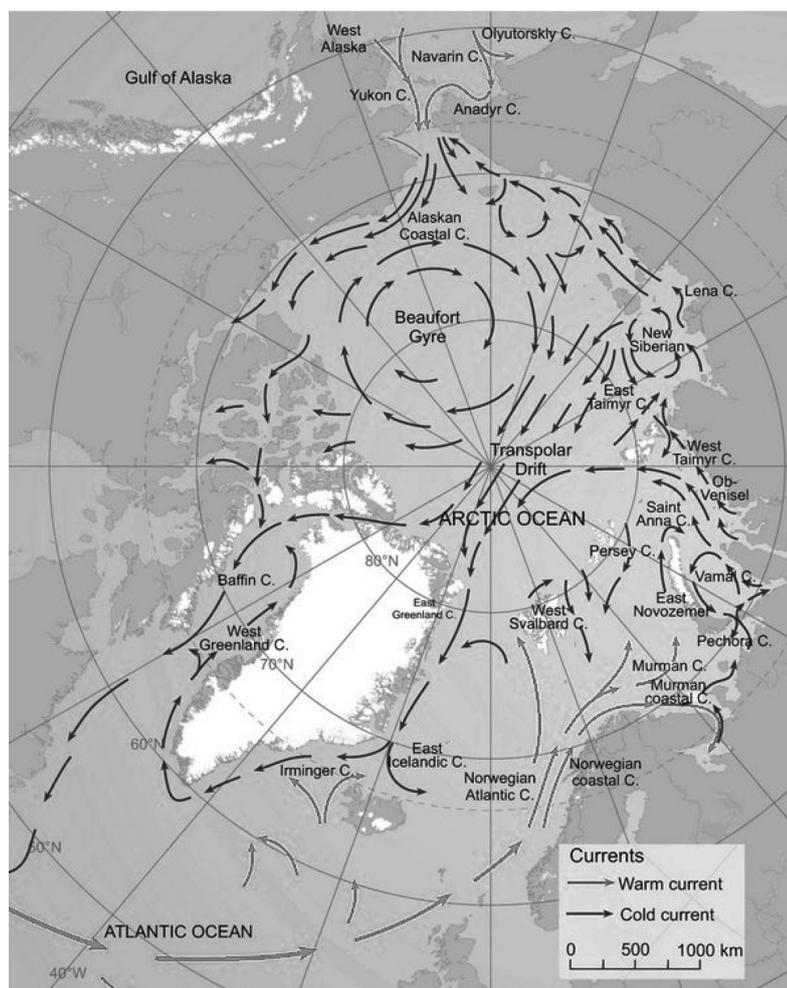


Рис. 1. Общая схема океанских течений в Арктическом регионе⁵

⁵Arctic Ocean Currents Map. URL: <http://library.arcticportal.org/id/eprint/1494> (дата обращения: 22.12.2016).

воздействие на район исследования оказывает теплое течение из Атлантического океана. Одно из его ответвлений – Норвежское прибрежное течение – движется на север вдоль западного побережья Норвегии на глубине 50–100 м водного столба [11, 12], проходит через Норвежское море вдоль северного побережья Норвегии и преобразуется затем, в Баренцевом море, в Мурманское прибрежное течение, которое завершает свой путь в Белом море. Влияние норвежских рек и фьордов на химический состав воды Норвежского течения значительно [13–15]: существует четко определенный фронт между холодной, низкой солености водой Норвежского течения и теплой, высокой солености водой Северо-Атлантического течения [13, 14, 16].

Вследствие того что Норвежское течение переносит в себе сток рек Норвегии, следует предусмотреть возможность его загрязнения в

случае чрезвычайных ситуаций, например затопления хвостохранилищ рудных месторождений [17], и переноса загрязненных вод на территорию Баренцева и Белого морей (ввиду небольшого охвата акватории Гренландского и Карского морей, анализ распределения свинца по ним не представлен).

Экологический мониторинг с помощью ЭАПК ($n = 1156$) показал, что в целом Баренцево и Белое моря Российской Арктики сохраняют относительно низкий уровень антропогенного загрязнения свинцом (среднее содержание свинца составило $(3,13 \pm 1,70)$ мкг/дм³ при предельно-допустимой концентрации (ПДК) в воде объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования 10 мкг/дм³ (по данным ГН 2.1.5.1315–03⁶), за исключением немногочисленных локальных участков (рис. 2, 3). Воды открытых морей отличаются от прибрежных

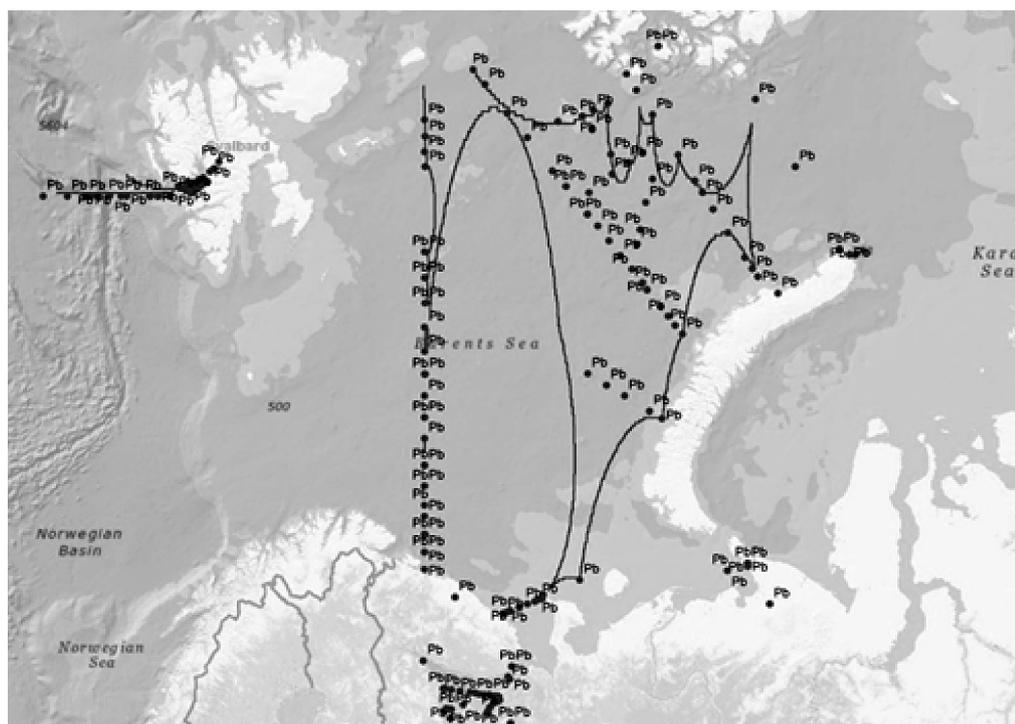


Рис. 2. Распределение свинца в водах Белого, Гренландского, Баренцева и Карского морей: ●Pb – места отбора проб; \ – изолиния (соединяет местоположения с равными концентрациями)

⁶ГН 2.1.5.1315–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Введ. 2003–04–27. М., 2003. 152 с.



Рис. 3. Содержание свинца в водах Белого моря: ● – < 1 ПДК; ○ – > 4 ПДК; • – места отбора проб

низкими концентрациями свинца, ниже предела обнаружения (71 % от общего числа проб), что может быть следствием процессов самоочищения и разбавления поступающих с суши загрязненных вод.

Содержание свинца в водах Белого моря составило $(6,23 \pm 2,80)$ мкг/дм³ ($n = 121$), это меньше ПДК, но больше среднего значения в целом по региону. Концентрация свинца только в 9 % случаев ниже предела обнаружения. Наибольшие концентрации обнаружены в местах интенсивной антропогенной деятельности: устье р. Северной Двины (г. Архангельск), арх. Соловецкие острова (пос. Соловецкий), пролив Горло Белого моря (пос. Сосновка).

Поступление тяжелых металлов с речными водами крупных рек (например, р. Северной Двины) невелико, поскольку воды успевают самоочищаться за счет работы естественного маргинального фильтра [18]. Данный факт в совокупности с повышенным содержанием свинца в прибрежных водах пос. Сосновка и пос. Соловецкий подтвердил ранее полученные выводы [7] о том, что основным источником поступления тяжелых металлов в Север-

ный Ледовитый океан является сток малых рек, в которых процесс самоочищения не может реализоваться в полной мере.

Заключение. ЭАПК обеспечивает обработку и наглядное представление данных об экологическом состоянии акватории морей западного сектора Арктической зоны РФ, что является составляющей информационного обеспечения принципа сохранения благоприятной экологической среды для реализации особого национального интереса РФ – устойчивого развития Российской Арктики.

С использованием ЭАПК показано, что моря Российской Арктики сохраняют относительно низкий уровень антропогенного загрязнения свинцом. Долговременное антропогенное влияние на морскую среду Арктики на данном этапе имеет локальный характер с формированием очагов техногенного загрязнения в приустьевых областях крупных рек и зонах портовой инфраструктуры. При этом поступление тяжелых металлов с речными водами крупных рек невелико, поскольку их большая протяженность обеспечивает эффективную работу естественного маргинального фильтра.

Список литературы

1. Кононович И.А. Национальные интересы России в арктических морях // Изв. Рос. гос. пед. ун-та им. А.И. Герцена. 2008. № 70-1. С. 198–201.
2. Золотарев И.И., Робинсон Б.В. Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды Восточного макрорегиона России // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2010. Т. 3, № 1. С. 39–41.
3. Конышев В.Н., Сергунин А.А. Национальные интересы России в Арктике: мифы и реальность // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2011. № 29. С. 2–11.
4. Основные положения стратегии устойчивого развития России / под ред. А.М. Шелехова. М., 2002. 161 с.
5. Юдахин Ф.Н., Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б. Экологические проблемы освоения нефтяных месторождений севера Тимано-Печорской провинции. Екатеринбург, 2002. 315 с.
6. Неёлов Ю.В. Экологическая безопасность Российской Арктики: некоторые организационно-правовые аспекты // Арктика: экология и экономика. 2011. № 1. С. 62–69.
7. Диагностический анализ состояния окружающей среды Арктической зоны Российской Федерации (Расширенное резюме) / отв. ред. Б.А. Моргунов. М., 2011. 200 с.
8. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2010 / под ред. А.Н. Коршенко. Обнинск, 2010. 196 с.
9. Кожевников А.Ю., Боголицын К.Г., Косяков Д.С., Варакин Е.А., Майоров И.С. Экспериментальный аппаратно-программный комплекс (ЭАПК) мониторинга загрязнения территории и акватории архипелага Шпицберген и Западной арктической зоны РФ экологически опасными химическими элементами и соединениями // Природные ресурсы и комплексное освоение прибрежных районов Арктической зоны: сб. науч. тр. Архангельск, 2016. С. 214–219.
10. Лапина Н.М., Торгунова Н.И., Агатова А.И. Биохимический мониторинг арктических морей России в условиях климатических изменений // Тр. ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 101–117.
11. Helland-Hansen B., Nansen F. The Norwegian Sea // Rep. Norw. Fish. Mar. Invest. 1909. Vol. 2. P. 1–359.
12. Ikeda M., Johannessen J.A., Lygre K., Sandven S. A Process Study of Mesoscale Meanders and Eddies in the Norwegian Coastal Current // J. Phys. Oceanog. 1989. Vol. 19. P. 20–35.
13. Mørk M. Circulation Phenomena and Frontal Dynamics of the Norwegian Coastal Current // Circulation and Fronts in Continental Shelf Seas. London, 1981. P. 635–647.
14. Haugan P.M., Evensen G., Johannessen J.A., Johannessen O.M., Pettersson L.H. Modeled and Observed Mesoscale Circulation and Wave Current Refraction During the 1988 Norwegian Continental Shelf Experiment // J. Geophys. Res. 1991. Vol. 96. P. 10487–10506.
15. Sætre R. Features of the Central Norwegian Shelf Circulation // Continental Shelf Research. 1999. Vol. 19. P. 1809–1831.
16. James I.D. A Primitive Equation Model Simulation of Eddies in the Norwegian Coastal Current // J. Phys. Oceanog. 1991. Vol. 21. P. 893–902.
17. Langedal M. The Influence of a Large Anthropogenic Sediment Source on the Fluvial Geomorphology of the Knabeåna-Kvina Rivers, Norway // Geomorphology. 1997. Vol. 19. P. 117–132.
18. Коробов В.Б. Новая книга о взвешенном веществе Белого моря и его гранулометрическом составе // Проблемы регион. экологии. 2011. № 6. С. 254–256.

References

1. Kononovich I.A. Natsional'nye interesy Rossii v arkticheskikh moryakh [National Interests of Russia in the Arctic Seas]. *Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Gertsena* [Izvestia: Herzen University Journal of Humanities and Science], 2008, no. 70-1, pp. 198–201.

2. Zolotarev I.I., Robinson B.V. Ratsional'noe ispol'zovanie prirodnykh resursov i okhrana okruzhayushchey sredy Vostochnogo makroregiona Rossii [Rational Use of Natural Resources and Environmental Protection of the Eastern Macro-Region of Russia]. *Interexpo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 2010, vol. 3, no. 1, pp. 39–41.
3. Konyshchev V.N., Sergunin A.A. Natsional'nye interesy Rossii v Arktike: mify i real'nost' [Russia's National Interests in Arctic: Myths and Realities]. *Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost'* [National Interests: Priorities and Security], 2011, no. 29, pp. 2–11.
4. Shelekhov A.M., ed. *Osnovnye polozheniya strategii ustoychivogo razvitiya Rossii* [Basic Provisions of the Strategy of Sustainable Development of Russia]. Moscow, 2002. 161 p.
5. Yudakhin F.N., Gubaydullin M.G., Korobov V.B. *Ekologicheskie problemy osvoeniya neftyanykh mestorozhdeniy severa Timano-Pechorskoy provintsii* [Ecological Problems of Development of Oil Deposits in the North of the Timan-Pechora Province]. Yekaterinburg, 2002. 315 p.
6. Neelov Yu.V. *Ekologicheskaya bezopasnost' Rossiyskoy Arktiki: nekotorye organizatsionno-pravovye aspekty* [Environmental Safety of the Russian Arctic: Some Organizational and Legal Aspects]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [The Arctic: Ecology and Economy], 2011, no. 1, pp. 62–69.
7. Morgunov B.A., ed. *Diagnosticheskiy analiz sostoyaniya okruzhayushchey sredy Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii (Rasshirennoe rezyume)* [Diagnostic Analysis of the Environmental Condition of the Arctic Zone of the Russian Federation (Extended Summary)]. Moscow, 2011. 200 p.
8. Korshenko A.N., ed. *Kachestvo morskikh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam. Ezhegodnik 2010* [The Quality of Sea Waters in Terms of Hydrochemical Indicators. Yearbook 2010]. Obninsk, 2010. 196 p.
9. Kozhevnikov A.Yu., Kosyakov D.S., Bogolitsyn K.G. Eksperimental'nyy apparatno-programmnyy kompleks (EAPK) monitoringa zagryazneniya territorii i akvatorii arhipelaga Shpitsbergen i Zapadnoy arkticheskoy zony RF ekologicheski opasnymi khimicheskimi elementami i soedineniyami [The Experimental Hardware and Software Complex for Pollution Monitoring of the Territory and Water Area of the Spitsbergen Archipelago and the Western Arctic Zone of the Russian Federation with Environmentally Hazardous Chemical Elements and Compounds]. *Prirodnye resursy i kompleksnoe osvoenie pribrezhnykh rayonov Arkticheskoy zony: sb. nauch. tr.* [Natural Resources and Integrated Development of Coastal Areas in the Arctic Zone]. Arkhangel'sk, 2016, pp. 214–219.
10. Lapina N.M., Torgunova N.I., Agatova A.I. Biokhimicheskiy monitoring arkticheskikh morey Rossii v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy [Biochemical Monitoring of the Russian Arctic Seas under the Climate Change]. *Trudy VNIRO*, 2014, vol. 152, pp. 101–117.
11. Helland-Hansen B., Nansen F. The Norwegian Sea. *Rep. Norw. Fish. Mar. Invest.*, 1909, vol. 2, pp. 1–359.
12. Ikeda M., Johannessen J.A., Lygre K., Sandven S. A Process Study of Mesoscale Meanders and Eddies in the Norwegian Coastal Current. *J. Phys. Oceanog.*, 1989, vol. 19, pp. 20–35.
13. Mørk M. Circulation Phenomena and Frontal Dynamics of the Norwegian Coastal Current. *Circulation and Fronts in Continental Shelf Seas*. London, 1981, pp. 635–647.
14. Haugan P.M., Evensen G., Johannessen J.A., Johannessen O.M., Petterson L.H. Modeled and Observed Mesoscale Circulation and Wave-Current Refraction During the 1988 Norwegian Continental Shelf Experiment. *J. Geophys. Res.*, 1991, vol. 96, pp. 10487–10506.
15. Sætre R. Features of the Central Norwegian Shelf Circulation. *Continental Shelf Research*, 1999, vol. 19, pp. 1809–1831.
16. James I.D. A Primitive Equation Model Simulation of Eddies in the Norwegian Coastal Current. *J. Phys. Oceanog.*, 1991, vol. 21, pp. 893–902.
17. Langedal M. The Influence of a Large Anthropogenic Sediment Source on the Fluvial Geomorphology of the Knabeåna-Kvina Rivers, Norway. *Geomorphology*, 1997, vol. 19, pp. 117–132.
18. Korobov V.B. Novaya kniga o vzveshennom veshchestve Belogo morya i ego granulometricheskom sostave [A New Book on the Suspended Matter of the White Sea and Its Granulometric Composition]. *Problemy regional'noy ekologii* [Regional Environmental Issues], 2011, no. 6, pp. 254–256.

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.2.71

Aleksandr Yu. Kozhevnikov, Evgeniy A. Varakin*, Il'ya S. Mayorov*,
Irina A. Kuznetsova**, Nikolay S. Larionov***

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russian Federation)

**Federal Center for Integrated Arctic Research, Russian Academy of Sciences
(Arkhangelsk, Russian Federation)

ECOLOGICAL MONITORING OF SEA LEAD CONTAMINATION IN THE RUSSIAN ARCTIC ZONE BY THE EXPERIMENTAL HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX

High resource potential of the Arctic region and the associated ecosystem load necessitate the development of effective tools for collecting and processing the increasing amount of environmental monitoring data. The structure and wide functionality of the experimental hardware and software complex developed by the authors ensure the processing and visual representation of a large body of data on the ecological state of the seas of the western sector of the Russian Arctic zone. This is a component of the information support of the environmental preservation principle for the realization of the special national interest of the Russian Federation – the sustainable development of the Russian Arctic. The experimental hardware and software complex demonstrates a relatively low level of anthropogenic lead pollution of the Russian Arctic seas. The average concentration of lead is $3.13 \pm 1.70 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, i.e. 0.3 of the maximum allowable lead concentration in water of the objects of household, cultural and general water use, established by the Russian Federation hygienic legislation. Lead concentration in the White Sea, which is the most susceptible to the anthropogenic impact, is 0.6 of the maximum permissible concentration. The long-term anthropogenic impact on the Arctic marine environment at this stage has a local character with the formation of technogenic pollution focus in the estuary areas of large rivers and port infrastructure zones. The flow of heavy metals by the large river waters (by the example of the Northern Dvina River) is low due to the effectiveness of the natural marginal filter.

Keywords: *seas of the Arctic zone of the Russian Federation, environmental monitoring of sea waters, automation of environmental monitoring, visualization of environmental monitoring data.*

Поступила 26.12.2016
Received on December 26, 2016

Corresponding author: Aleksandr Kozhevnikov, *address:* Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; *e-mail:* a.kozhevnikov@narfu.ru

For citation: Kozhevnikov A.Yu., Varakin E.A., Mayorov I.S., Kuznetsova I.A., Larionov N.S. Ecological Monitoring of Sea Lead Contamination in the Russian Arctic Zone by the Experimental Hardware and Software Complex. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 71–78. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.2.71