



РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АРКТИЧЕСКОЙ ТЕРРИТОРИИ ОПАСНЫМИ ХИМИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И СОЕДИНЕНИЯМИ

КОЖЕВНИКОВ *Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, akozhevnikov@mail.ru*
Александр Юрьевич

КОСЯКОВ *Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, kosyakov@mail.ru*
Дмитрий Сергеевич

ВАРАКИН *Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, varakin.ev@yandex.ru*
Евгений Александрович

МАЙОРОВ *Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, ilmay@mail.ru*
Илья Сергеевич

Ключевые слова:

Арктика
экологический мониторинг
автоматизация
визуализация
база данных
геоинформационная система

Аннотация: В ходе данной работы предложено использовать экспериментальный аппаратно-программный комплекс (ЭАПК) для автоматизации комплексного эколого-аналитического контроля состояния объектов окружающей среды при осуществлении экспедиционных и исследовательских работ. Комплекс осуществляет представление полученных данных на картографической основе в ГИС ArcView 10.1. ЭАПК использует результаты анализов токсикантов в морских водах, снеге, льде и донных отложениях. Автоматизированные функции комплекса существенно сокращают время по обработке, визуализации и анализу данных, полученных в результате экологического мониторинга природных объектов Арктики.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Е. С. Сашина
В. В. Вапиров

Получена: 5 октября 2016 года

Подписана к печати: 07 декабря 2016 года

Введение

Развитие Арктического региона в настоящее время является приоритетной задачей России (Юшкин и др., 2006). Особую антропогенную нагрузку испытывает за-

падный сектор Арктики в связи с высокой концентрацией промышленного потенциала на Европейской территории России, а также активной реализацией проектов по добыче углеводородного сырья на Аркти-

ческом шельфе (Стоун, 1998). Для эффективного контроля и успешной борьбы с негативным влиянием на природу Арктических регионов необходима интеграция усилий российских исследовательских групп, работающих по данному направлению, создание мощной научной инфраструктуры, включающей наиболее современное и высокопроизводительное оборудование, а также создание дополнительного методического обеспечения.

В связи с этим целью настоящей работы является разработка экспериментального аппаратно-программного комплекса для экологического мониторинга загрязнения арктической территории опасными химическими элементами и соединениями и его апробация с использованием проб объектов окружающей среды.

Традиционные методы исследований

Под экологическим мониторингом понимается система регулярных наблюдений природных сред, выполняемых по определенной программе, которые позволяют выделить изменения в их состоянии, происходящие, в том числе, под влиянием антропогенной деятельности. Результаты таких работ позволяют оценить состояние экосистем и динамику их изменений, создать предпосылки по выработке мер минимизации неблагоприятного воздействия на окружающую среду и в перспективе осуществить разработку природоохранных мероприятий.

Значительная часть данных об экологическом состоянии арктических территорий поступает при производстве гидрологических и гидрохимических работ. Выполнение химического анализа морских вод при экологическом мониторинге подробно расписано в ряде руководств и носит обязательный характер. Кроме того, существует ряд ведомственных руководств, которые или обеспечивают большую точность анализов, или определяют необходимость специализированных наблюдений (Сапожников, 1988; Руководство..., 2003).

Требования к качеству вод регламентируются в местах водопользования населения и изложены в СанПиН 2.1.5.2582-10. В перечень контролируемых химических и физико-химических показа-

телей внесены рН, биогенные элементы, растворенный кислород, биохимическое и химическое потребление кислорода (БПК и ХПК), остаточный хлор. При этом, в отличие от регулярных наблюдений, проводимых на стационарной сети наземных береговых и островных станций, сеть океанографических наблюдений можно характеризовать как нестационарную во времени и нерегулярную в пространстве, базирующуюся на данных, получаемых с морских судов, автономных буев и арктических экспедиций.

В связи с перспективами дальнейшего освоения шельфа и растущими объемами транспортных перевозок в Западном секторе Арктики при оценке состояния морской среды повышенное внимание следует уделять контролю не только общих гидрохимических показателей, но и мониторингу загрязнения морских вод, снежного покрова, донных отложений. При этом для ряда гидрохимических показателей (биогенные вещества, нефтепродукты) методическое обеспечение удовлетворяет требованиям точности, воспроизводимости и чувствительности, в то время как для идентификации важнейших суперэкоотоксикантов общего органического углерода, полиароматических углеводородов, хлорированных углеводородов, тяжелых металлов требуется разработка высокоточных чувствительных методов.

Для накопления информации о концентрации вышеописанных токсикантов с последующим комплексным анализом необходима организация соответствующих обширных баз данных. Это позволит не только определить вклад характерных для конкретной акватории источников загрязнений и факторов окружающей среды (климатических, гидрологических, геолого-морфологических), влияющих на распространение загрязнений, но и обеспечить интеграцию полученных результатов с существующими и разрабатываемыми системами федеральных органов исполнительной власти для оперативного принятия управленческих решений.

Оригинальные методы исследований

Современным актуальным направлением развития экологических исследований является автоматизация процессов

обработки и накопления данных о концентрации токсикантов в объектах окружающей среды с последующим представлением информации на картооснове. Визуализация получаемых данных количественного химического анализа позволит в значительной мере упростить комплексный анализ распространения экотоксикантов в Западном секторе Российской Арктики при осуществлении эколого-аналитического мониторинга.

В процессе выполнения данной работы был создан ЭАПК, позволяющий сократить время обработки, анализа и визуализации данных о концентрации токсикантов в природных объектах Западной Арктики. Предварительно были разработаны методики высокочувствительного детектирования опасных химических элементов и соединений в морских водах и в донных отложениях Арктической зоны РФ, а именно:

– методика определения тяжелых металлов в морских водах (Боголицын, 2014). Согласно данной методике, возможно одновременное и экспрессное измерение концентрации семи тяжелых металлов в морской воде. Методика основана на их экстракционном концентрировании в виде диэтилдитиокарбаматных комплексов с последующим рентгенофлуоресцентным определением. Использование экстракционного разделения позволяет устранить затруднения метода рентгенофлуоресцентной спектроскопии полного внешнего отражения, связанные с большим содержанием солей в морской воде. За счет снижения рассеяния и матричных эффектов достигается повышение чувствительности анализа. К существенным преимуществам предложенного метода относятся малый объем пробы, необходимый для анализа, и возможность выполнения измерений в условиях судовой лаборатории;

– методика определения хлорфенолов в морской воде и донных отложениях (Боголицын, 2014). При применении данной методики происходит одновременное и экспрессное определение 13 токсичных фенолов и хлорфенолов в почвах, донных отложениях, природных, питьевых и морских водах. Методика основана на применении быстрого хроматографического разделения с высокочувствительным tandemным масс-спектрометрическим детектированием.

Оптимизированные условия хроматографического разделения и масс-спектрометрического детектирования позволяют разделять 15 аналитов за 12 минут анализа. Использование tandemного масс-спектрометрического детектирования позволило отказаться от одного из этапов пробоподготовки без потери чувствительности и качества разделения аналитов. При разработке методики были построены градуировочные характеристики в диапазоне концентраций от 50 до 10000 мкг/л. Достигнуты (без учета концентрирования проб) пределы обнаружения ниже 1 мкг/л. Разработанные процедуры пробоподготовки позволили достичь пределов обнаружения (с учетом концентрирования) ниже 1 мкг/кг для твердых объектов и ниже 1 нг/л для морской воды. Данные пределы обнаружения значительно ниже ПДК, что позволяет применять данную методику для анализа всего спектра объектов, включая воды рыбохозяйственных водоемов;

– методика определения общего органического углерода в морской воде (Боголицын, 2014). Методика основана на предварительном подкислении и отдувке общего неорганического углерода, находящегося в пробе воды, каталитическом окислении соединений углерода при температуре от 800 °С в присутствии кислорода до диоксида углерода (IV) и последующем определении общего органического углерода с использованием детектора инфракрасного излучения. Предложенный метод учитывает особенности объекта исследования (морской воды) по сравнению с традиционными объектами исследования (поверхностные воды суши, очищенная вода, сточные воды);

– методика одновременного и экспрессного определения шестнадцати важнейших представителей класса полициклических ароматических углеводородов в снеге, ледяном покрове и почве (Боголицын, 2014). Методика основана на применении высокоэффективного хроматографического разделения с последующим tandemным масс-спектрометрическим детектированием. Новизна предложенных подходов заключается в использовании сочетания фотохимической ионизации аналитов при атмосферном давлении с детектированием в режиме мониторинга заданных ре-

акций с выбором идентичных ионов-предшественников и продукт-ионов, а также применении диссоциации, активированной соударениями, для снижения матричных эффектов, повышения чувствительности и селективности анализа. Предложенная методика превосходит по чувствительности более чем на порядок известные и применяемые в настоящее время подходы, базирующиеся на использовании хроматомасс-спектрометрии с химической ионизацией, а также тандемной масс-спектрометрии. Достижимые пределы обнаружения лежат в диапазоне 0.6–40 мкг/кг без применения предварительного концентрирования проб, что не уступает результатам, получаемым с использованием флуоресцентного детектирования при несопоставимо более высокой селективности анализа, исключающей получение ошибочных данных. Для наиболее токсичного компонента – бенз(а)пирена – достигаемый предел обнаружения в три раза ниже предельно допустимой концентрации для водных объектов (в том числе снега и льда) и более чем в 30 раз ниже в случае почв и донных отложений.

В соответствии с разработанными методиками, в качестве аппаратной части разрабатываемого комплекса использовали научное оборудование для высокочувствительного детектирования опасных химических элементов, в частности:

- рентгенофлуоресцентный спектрометр полного внешнего отражения S2 Picofox в модификации с модулем автоматической загрузки проб;

- газовый хроматомасс-спектрометр Agilent 7890/7000B, состоящий из газового хроматографа Agilent 7890A и тандемного масс-спектрометрического детектора с тройным квадруполем Agilent 7000;

- элементный анализатор MultiEA 5000;

- ВЭЖХ-МС/МС-система, состоящая из тандемного гибридного масс-спектрометра QTRAP 3200, оснащенного источником фотохимической ионизации при атмосферном давлении Photospray, и жидкостного хроматографа Ultimate 3000.

Также при разработке ЭАПК применяли ранее созданную базу данных, предназначенную для хранения информации, полученной в ходе измерений распростра-

нения и распределения опасных химических элементов и соединений в морских водах и донных отложениях (Боголицын, 2014).

При создании ЭАПК было принято решение использовать модульную структуру с четким разделением выполняемых функций. В процессе функционирования комплекса автоматизированные процедуры обмена данными между модулями осуществляются при помощи разработанного программного обеспечения. Были определены следующие функциональные модули, входящие в состав ЭАПК:

- программный модуль управления;
- программный модуль визуализации и управления режимами отображения выходных данных;

- программный модуль управления обработкой и хранением усвоенной информации;

- программный модуль представления данных в ГИС ArcView 10.1.

После выполнения анализов проб объектов окружающей среды, в соответствии с разработанными методиками, протоколы количественного химического анализа (протоколы измерений) сохраняются в специальный каталог сервера ЭАПК посредством локальной сети. Сотрудник, ответственный за отбор проб, сохраняет информацию о пробах (координаты отбора, время, тип пробы и т. д.) в виде xls-файла в специальный каталог сервера ЭАПК. Далее разработанные функциональные модули ЭАПК обеспечивают возможность последовательного выполнения следующих процессов:

- программный модуль управления импортирует данные, полученные из файлов протоколов измерений, распознает их с помощью уникального алгоритма, соотносит с информацией о местах отбора проб и добавляет в базу данных;

- программный модуль управления обработкой и хранением усвоенной информации включает в себя базу данных опасных химических элементов и соединений. Модуль предназначен для управления базой данных, а именно – для редактирования и/или удаления отдельных записей информации о концентрации опасных химических элементов и соединений в про-

анализированных пробах объектов окружающей среды;

– программный модуль визуализации и управления режимами отображения выходных данных осуществляет выборку информации из базы данных согласно запросу пользователя с помощью специального диалогового окна и на ее основе формирует шаблон представления для ArcGIS;

– программный модуль представления данных в ГИС ArcView 10.1 предназначен для визуализации данных распространения и распределения опасных химиче-

ских элементов. Позволяет автоматически управлять отображением информации, полученной из базы данных, с возможностью построения изолиний, зон, векторов, которые далее отображаются в ГИС.

В качестве каналов связи служит локальная сеть, обеспечивающая поступление данных количественного химического анализа от научного оборудования к серверу с установленным ЭАПК. В соответствии с функциональными возможностями, в ЭАПК реализована следующая схема организационной структуры, приведенная на рис. 1.

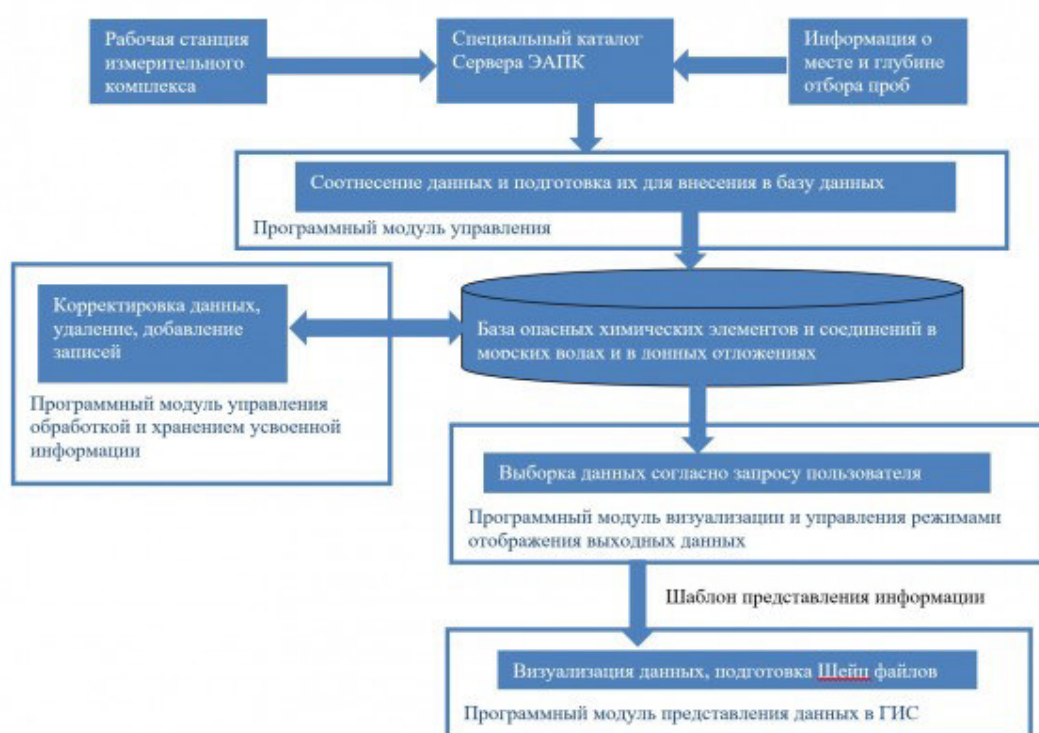


Рис. 1. Функциональная схема работы экспериментального аппаратно-программного комплекса
Fig. 1. Functional scheme of the experimental hardware and software complex

Основная сложность при разработке ЭАПК состояла в реализации автоматического считывания данных количественного химического анализа, получаемых с аналитического оборудования. Данный подход позволил исключить возможность случайной или умышленной ошибки со стороны лаборанта, производящего количественный химический анализ, а также исключить ручное соотнесение результатов с местами отбора проб. Экологи, ученые-исследователи, контролирующие органы и т. д. являются непосредственными потре-

бителями информации, полученной с помощью ЭАПК.

Для апробации комплекса проводили исследовательские испытания. Тестировали ЭАПК, используя результаты количественного химического анализа, накопленные в базе данных по результатам экспедиций в рамках проекта «Арктический плавающий университет 2013–2016 гг.». Проверили работу всех программных модулей, а также последовательные автоматизированные функции комплекса, начиная от проведения количественного химического

анализа, заканчивая визуализацией полученных данных.

Комплекс позволяет представлять в ГИС информацию о загрязнителях с отображением концентрации заданного элемента или соединения либо доли превышения ПДК. Представление данных реали-

зовано в виде окружностей или изолиний. На рис. 2 представлен пример интерфейса программного модуля визуализации и управления режимами отображения выходными данными ЭАПК.

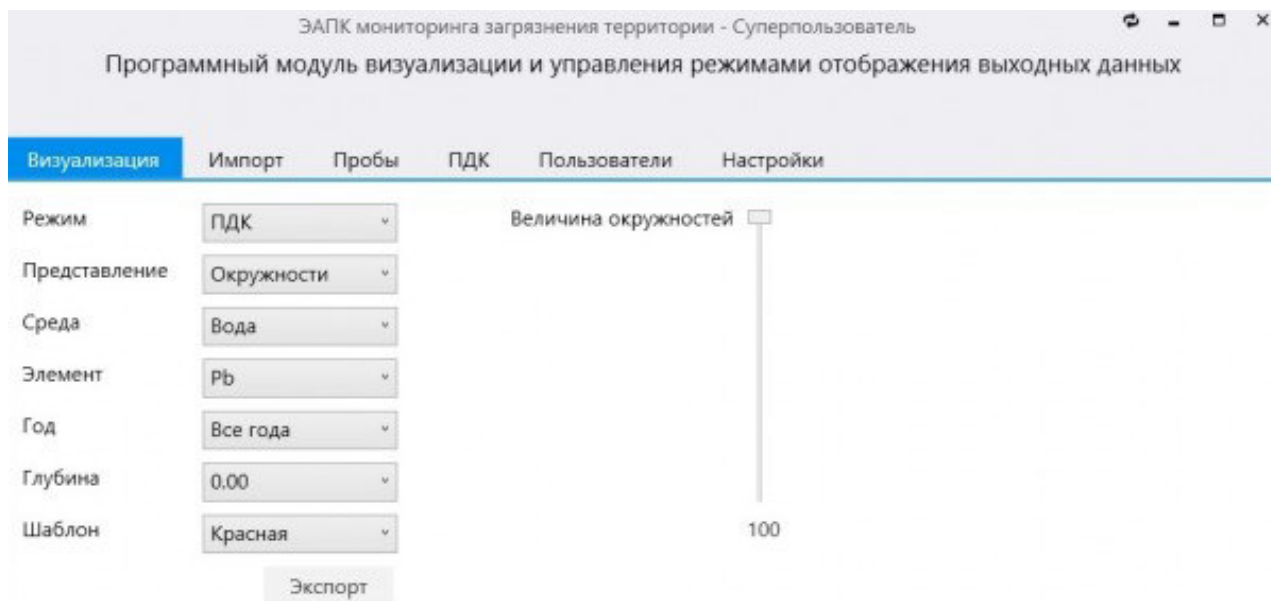


Рис. 2. Пример работы программного модуля визуализации и управления режимами отображения данных

Fig. 2. An example of the work of the software module for visualization and data display mode control

На рис. 3 представлен пример визуализации данных о распределении свинца в морской воде (поверхностный слой) акватории Белого моря. Информация о превышении концентрации данного элемента представлена на картооснове ГИС ArcView 10.1 в долях ПДК.

Часть результатов представлена в виде океанологических разрезов: «мыс Канин Нос – мыс Святой Нос», «мыс Зимнегорский – Ивановы Луды», «Двинской залив». Превышения ПДК изображены на карте овалами, которые выделены цветом в зависимости от величины превышения. Точками показаны отобранные пробы, в которых концентрация свинца находится в пределах нормы.

В большей части проанализированных проб выявлены превышения концентрации свинца. Известно, что основным источником загрязнения Белого моря являют-

ся речные стоки, содержащие загрязняющие вещества предприятий целлюлозно-бумажной промышленности, жилищно-коммунального хозяйства, судов речного и морского флота. Особую опасность представляют сточные воды промышленных предприятий. Наибольшую опасность для локальных районов Белого моря (Двинской залив, Кандалакшский залив, устьевая область и дельта р. Северная Двина) представляет загрязнение тяжелыми металлами, нефтяными углеводородами, фенолами (Коршенко и др., 2010). Меньше всего превышений ПДК свинца присутствует в пробах, отобранных на океанологическом разрезе: мыс «Канин Нос – мыс Святой Нос». Данный район Белого моря подвергается загрязнению в меньшей степени вследствие интенсивного притока незагрязненных баренцевоморских вод и отсутствия местных крупных источников сброса загрязняющих веществ.

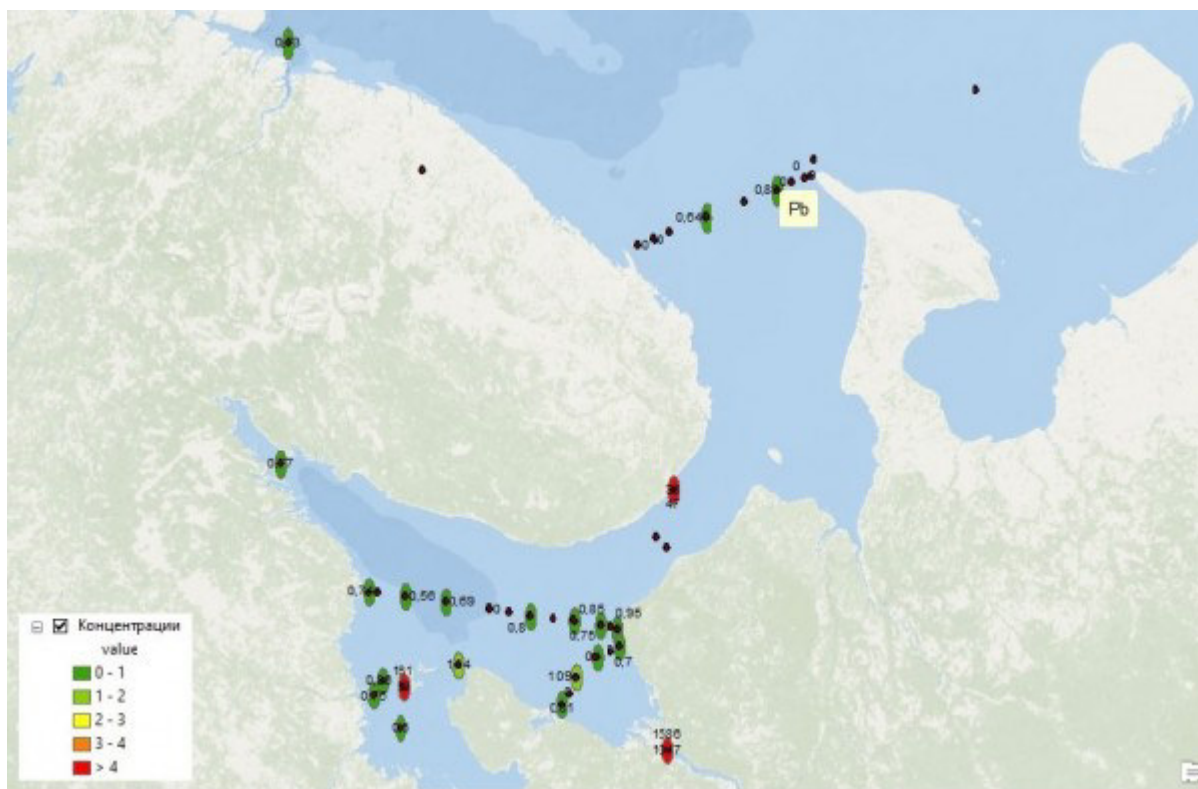


Рис. 3. Пример визуализации данных превышения содержания свинца в морской воде Белого моря (поверхностный слой)

Fig. 3. An example of data visualization showing excess lead content in sea water in the White sea (surface layer)

Заключение или выводы

В ходе данной работы разработан ЭАПК, служащий для автоматизации комплексного эколого-аналитического контроля состояния объектов окружающей среды. Показана возможность использования данного комплекса при проведении анализов проб объектов окружающей среды, в частности арктических территорий. Новизна данной разработки заключается в автома-

тическом распознавании результатов количественного химического анализа, соотношении полученных данных с координатами отбора проб, устранении человеческого фактора при обработке информации. Исследовательские испытания комплекса показали его эффективную работу при проведении комплексного экологического мониторинга природных объектов Арктики.

Библиография

- Юшкин В. Е., Фортов Ю. Г., Леонова Н. П. Арктика в стратегии реализации топливно-энергетических перспектив. М.: Наука, 2006. 254 с.
- Стоун Д. Загрязнение Арктики. Доклад о состоянии окружающей среды Арктики. АМАП: Программа Арктического мониторинга и оценки. СПб: Гидрометеоиздат, 1998. 188 с.
- Сапожников В. В. Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. М.: Изд-во ВНИРО, 1988. 118 с.
- Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов мирового океана / Под ред. В. В. Сапожникова. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
- Боголицын К. Г. Создание новых методов и средств мониторинга загрязнения территории и акватории архипелага Шпицберген: Отчет о ПНИЭР № ГР 114103140060. Архангельск, 2014. 260 с.

Кожевников А. Ю., Косяков Д. С., Варакин Е. А., Майоров И. С. Разработка экспериментального аппаратно-программного комплекса для экологического мониторинга загрязнения арктической территории опасными химическими элементами и соединениями // Принципы экологии. 2016. № 5. С. 81–90. DOI: 10.15393/j1.art.2016.5824

Коршенко А. Н., Матвейчук И. Г., Плотникова Т. И., Панова А. И., Иванов Д. Б., Кирьянов В. С., Крутов А. Н., Кочетков В. В., Ермаков В. Б. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2010 . Обнинск: ОАО «ФОП», 2010. 198 с.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России при выполнении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) 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 № 14.610.21.0006, уникальный идентификатор ПНИЭРФМЕФИ61014Х0006) с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» САФУ.

DEVELOPMENT OF THE EXPERIMENTAL HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR ENVIRONMENTAL MONITORING OF POLLUTION OF THE ARCTIC TERRITORY WITH DANGEROUS CHEMICAL ELEMENTS AND COMPOUNDS

KOZHEVNIKOV *M.V.Lomonosov's Northern (Arctic) Federal University,*
Aleksandre Y. *akozhevnikov@mail.ru*

KOSYAKOV *M.V.Lomonosov's Northern (Arctic) Federal University,*
Dmitriy Sergeevich *kosyakov@mail.ru*

VARAKIN *M.V.Lomonosov's Northern (Arctic) Federal University,*
Evgeniy Aleksandrovich *varakin.ev@yandex.ru*

MAJOROV *M.V.Lomonosov's Northern (Arctic) Federal University,*
Il Sergeevich *ilmay@mail.ru*

Key words:

Arctic
environmental monitoring
automation
visualization
data base
geographic information system

Summary: In the course of the work, it has been proposed to use the experimental hardware and software complex (EHSC) for the automation of the complex environmental analytical monitoring during expeditions and research. The complex presents data in a cartographic mode in GIS ArcView 10.1. EHSC allows to present the data of toxicants analysis in sea water, snow, ice and bottom sediments. The novelty of this design lies in the automatic recognition of quantitative chemical analysis results, correlation of obtained data with sampling coordinates, elimination of the human factor during information processing. Automated functions of the complex significantly reduce the time of processing, analysis and visualization of the data obtained as a result of environmental monitoring of the natural objects in the Arctic.

Reviewer: E. S. Sashina
V. V. Vapirov

Received on: 21 October 2016

Published on: 07 December 2016

References

- Yushkin V. E. Fortov Yu. G. Leonova N. P. Arctic in the strategy of fuel and energy prospects implementation. M.: Nauka, 2006. 254 p.
- Stoun D. Report on the state of the Arctic environment. AMAP: Programma Arkticheskogo monitoringa i ochenki. SPb: Gidrometeoizdat, 1998. 188 p.
- Sapozhnikov V. V. Methods of hydrochemical research of basic biogenic elements. M.: Izd-vo VNIRO, 1988. 118 p.
- Guidelines for chemical analysis of sea and fresh water during environmental monitoring of fishery waters and areas of the world ocean profitable for fishing, Pod red. V. V. Sapozhnikova. M.: Izd-vo VNIRO, 2003. 202 p.
- Bogolycyn K. G. Development of new methods and means of monitoring Svalbard territory and waters contamination: отчет о ПНИЭР № GR 114103140060. Arhangel'sk, 2014. 260 p.

Kozhevnikov A., Kosyakov D., Varakin E., Majorov I. Development of the experimental hardware and software complex for environmental monitoring of pollution of the Arctic territory with dangerous chemical elements and compounds // Principy èkologii. 2016. Vol. 5. № 5. P. 81–90. DOI: 10.15393/j1.art.2016.5824

Korshenko A. N. Matveychuk I. G. Plotnikova T. I. Panova A. I. Ivanov D. B. Kir'yanov V. S. Krutov A. N. Kochetkov V. V. Ermakov V. B. Quality of sea water according to hydrochemical indicators. Ezhegodnik 2010. Obninsk: OAO «FOP», 2010. 198 p.