

МОНИТОРИНГ ДИНАМИКИ БЕРЕГОВ И ДНА ЗАМЕРЗАЮЩИХ МОРЕЙ КАК ОСНОВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ



Фото Н.Г. Беловой

ЕРМОЛОВ А.А.*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, ermolov@geogr.msu.ru

Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия

ОГОРОДОВ С.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, ogorodov@geogr.msu.ru

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 13.02.2023 / Принята к публикации 26.03.2023 / Дата публикации 30.03.2023

© ООО «Геомаркетинг», 2023

Аннотация: в статье рассмотрены основные принципы и методические подходы к проведению мониторинга динамики берегов и дна замерзающих морей на этапах проектирования, строительства и эксплуатации инженерных объектов нефтегазового комплекса. Сформулированы основные цели и задачи изучения морских берегов, рассмотрена накопленная научная база, описаны применяемые на практике методы исследований и особенности проведения работ. Важными источниками информации о берегах являются данные дистанционного зондирования Земли, к числу которых относятся не только космические снимки, но и фотоматериалы специальных авиационных исследований, а также данные, получаемые при помощи беспилотных летательных аппаратов. Дешифрирование, сравнительный анализ и другие задачи, решаемые дистанционными методами исследований, играют важную роль в изучении динамики берегов и сопряженных экзогенных процессов. Подчеркивается необходимость выполнения полевых исследований как основного источника фактических данных о различных компонентах природной среды, составляющих основу для анализа текущего состояния и прогноза развития береговых систем. Именно натурные исследования позволяют детально изучать проявления опасных экзогенных процессов и получать количественные оценки возможных деформаций рельефа береговой зоны и дна, определять граничные условия безопасной эксплуатации сооружений, осуществлять выбор участка строительства, типа и конструкции фундаментов, величину заглубления, технологию строительства, способы инженерной защиты территории и многое другое. На этапах строительства и эксплуатации сооружений полевые работы при мониторинге динамики берегов позволяют получать информацию о развитии опасных природных процессов и способствуют снижению негативного влияния инженерных объектов на природную среду, обеспечивая тем самым промышленную и экологическую безопасность.

Ключевые слова: морские берега; опасные экзогенные процессы; литодинамика; мониторинг; методы исследований; прогноз развития

Благодарности: работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 22-17-00097. При подготовке статьи также использованы результаты многолетнего мониторинга динамики берегов и дна арктических морей России, полученные ранее при выполнении государственной бюджетной темы научно-исследовательской работы научно-исследовательской лаборатории геоэкологии Севера географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова № 121051100167-1.

Ссылка для цитирования: Ермолов А.А., Огородов С.А., 2023. Мониторинг динамики берегов и дна замерзающих морей как основа обеспечения промышленной и экологической безопасности инженерных объектов. ГеоРиск, Том XVII, № 1, с. 42–50, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2023-17-1-42-50>.

MONITORING OF THE COAST AND BOTTOM DYNAMICS IN THE FREEZING SEAS AS A BASIS FOR ENSURING GEOTECHNICAL AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF ENGINEERING FACILITIES

ALEXANDER A. ERMOLOV*

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; ermolov@geogr.msu.ru

Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

STANISLAV A. OGORODOV

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; ogorodov@geogr.msu.ru

Original paper

Received 13 February 2023 / Accepted 26 March 2023 / Published 30 March 2023

© Geomarketing LLC, 2023

Abstract: the paper discusses the basic principles and methodological approaches to monitoring of coast and bottom dynamics in the freezing seas at the stages of design, construction, and operation of engineering facilities of the oil and gas complex. The main goals and objectives of the study of coasts are formulated; the existing scientific basis is reviewed; the research methods used in practice and the features of the work are described. Important sources of information about the coasts are remote sensing data, which include not only satellite images, but also photographic materials of special aviation surveys, as well as data obtained using unmanned aerial vehicles. Images interpretation, comparative analysis, and other tasks solved by remote research methods play an important role in studying the coasts dynamics and associated exogenous processes. The necessity of performing field research as the main source of actual data on various components of the natural environment that form the basis for analyzing the current state and forecasting the development of coastal systems is emphasized. It is field studies that allow us to study in detail the manifestations of dangerous exogenous processes and to obtain quantitative estimates of possible deformations of the coastal zone and the bottom topography, to determine the boundary conditions for the safe operation of structures, to select the construction site, the type and design of the foundation, the depth of penetration, construction technology, methods of engineering protection of the territory, etc. At the stages of construction and operation of structures, field work within the framework of monitoring the dynamics of the coasts allows you to control the development of dangerous natural and natural-technical processes and helps to reduce the negative impact of engineering facilities on the natural environment, thereby ensuring environmental and industrial safety.

Key words: sea coasts; dangerous exogenous processes; lithodynamics; monitoring; research methods; development forecast

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-17-00097. It was also used the results of long-term monitoring of the dynamics of the coasts and bottom of the Arctic seas of Russia, obtained earlier within the framework of the state budget theme of research work of the Research Laboratory of Geoecology of the North, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, No. 121051100167-1.

For citation: Ermolov A.A., Ogorodov S.A., 2023. Monitoring of the coast and bottom dynamics in the freezing seas as a basis for ensuring industrial and environmental safety of engineering facilities. *GeoRisk World*, Vol. XVII, No. 1, pp. 42–50, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2023-17-1-42-50>.

Введение

Берега и дно замерзающих морей России в последние десятилетия испытывают все возрастающее техногенное воздействие в связи с реализацией проектов по добыче и транспорту углеводородного сырья. Строительство инженерных объектов в прибрежно-шельфовой зоне требует достоверной оценки рисков, предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с динамикой берегов и развитием сопряженных экзогенных процессов. Решение подобных задач предполагает получение необходимых сведений для проектирования объектов производственной и транспортной инфраструктуры, обеспечения промышленной и экологической безопасности на различных этапах строительства и

эксплуатации инженерных сооружений, защите территорий населенных пунктов и промышленных объектов, расположенных на берегах.

Являясь областью интенсивного взаимодействия литосферы, атмосферы и гидросферы, береговая зона представляет собой весьма контрастную, динамичную и уникальную в физико-географическом, экологическом и социально-экономическом отношении систему, обладающую повышенной чувствительностью к изменениям техногенных условий, климатических параметров и ледовитости морей [15, 16]. Около половины протяженности береговой линии в Арктической зоне РФ сложено многолетнемерзлыми дисперсными грунтами и подвержено воздействию деструктивных экзогенных (в частности, криогенных) процессов [17]. Мно-

гие из них распространены на участках, вовлеченных в хозяйственную деятельность, создают риски для инженерных объектов и относятся к категории опасных. Это термоэрозия, термокарст (в т.ч. просадки поверхности дна), ледовая экзарация дна, термоденудация и термоабразия, связанная с таянием льдистых грунтов на берегах и последующей переработкой морским волнением [1].

С начала XXI в. на фоне происходящих изменений климата отмечается активизация этих и других экзогенных процессов, чутко реагирующих на изменения температур многолетнемерзлых грунтов. Расчеты изменения климатических параметров показывают, что тенденция будет сохраняться. Так, к 2050 г. прогнозируется повышение температуры января на побережье Карского моря (на территории Ямало-Ненецкого

автономного округа) примерно на 4,5°C, а температуры июля — на 2,5°C. Месячные суммы осадков увеличатся в среднем на 10% в январе и останутся неизменными в июле [9]. Сокращение площади льдов и рост продолжительности безледного периода приведут к изменению волнового воздействия на берега и росту темпов термоабразии. Особенно быстро начнут отступать сравнительно низкие берега, сложенные сильнольдистыми грунтами и содержащими пластовые льды. Протяженные отрезки таких берегов располагаются в пределах активно осваиваемых сегодня и планируемых к освоению в ближайшие годы территорий на п-ове Ямал, Гыданском п-ове и в других районах Арктики. Это обуславливает особую актуальность исследований динамики берегов и необходимость организации их мониторинга на ключевых участках.

Цели и задачи работ

Предупреждение и ликвидация последствий деятельности опасных процессов, развитых в береговой зоне, представляют собой сложную задачу, для решения которой применяется комплексный научно-технический подход. Наиболее полные данные о развитии береговых процессов получают в ходе литодинамических исследований, которые являются частью инженерно-гидрометеорологических изысканий и используют результаты инженерно-геологических, инженерно-геодезических изысканий, инженерно-гидрографических работ и отличаются спецификой предмета изучения и используемыми методами. Состав и содержание литодинамических исследований сформулированы в СП 504.1325800.2021 «Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования», СП 482.1325800.2020 «Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ», а также в ряде практических руководств [5, 10].

В наиболее общем виде целью таких работ является получение количественных характеристик береговых процессов, необходимых для проектирования, обеспечения надежности (эффективности) эксплуатации сооружений и оценки их влияния на морфологию и динамику береговой зоны сопряженных участков. Предметом исследований выступают динамика рельефа и транспорт наносов в прибрежной зоне.

Инженерное значение исследований заключается в оценке возможных деформаций рельефа береговой зоны и дна в период эксплуатации сооружений. Это необходимо для определения граничных условий безопасной эксплуатации при выборе проектных решений (участка размещения, типа фундамента, его заглубления, инженерной защиты и пр.) и оценки влияния сооружений на морфологию и динамику берега и дна в случае нарушения условий вдольберегового транспорта наносов, изменении положения береговой линии, рельефа дна и пр. При этом учитывается результат деятельности всего комплекса процессов и явлений, включая гравитационные, склоновые, мерзлотные, эрозийные процессы, штормовые нагоны, техногенное воздействие и др.

Основными результатами литодинамических исследований, как правило, являются установленные максимальные и среднесуточные скорости разрушения береговых уступов и изменения положения береговой линии (отступление или выдвижение), оценка динамики несвязных наносов (заносимость, размыв), величины изменения профиля подводного склона и берегового уступа в результате размыва или аккумуляции, глубина проникновения кия ледяных образований в грунт, эффективность берегозащитных конструкций и пр. Прогноз деформации берегов и дна позволяет минимизировать риски возникновения чрезвычайных ситуаций и нежелательные последствия строительства для природной среды, разрабатывать рекомендации по защите территорий, зданий и сооружений.

Организация мониторинга динамики берегов и сопряженных экзогенных процессов выполняется в соответствии с целевой программой, разработка которой осуществляется отдельно для каждого проектируемого объекта на основании региональных или детальных литодинамических исследований, проводившихся в данном районе, материалах инженерных изысканий и исследований прошлых лет. Содержание программы определяется техническими характеристиками объекта и существующими природными условиями, в соответствии с которыми и формируются задачи исследования, система применяемых методов, подбираются оборудование и технология выполнения работ, обосновываются структура наблюдаемых параметров, периодичность наблюдений и функционирова-

ние всей системы мониторинга. Одними из важнейших результатов, наряду с фактической оценкой состояния компонентов геологической среды и получением всех необходимых сведений, являются рекомендации по предупреждению и предотвращению неблагоприятных и чрезвычайных событий геологического и техногенного характера. Подобные рекомендации, основанные на анализе всех факторов устойчивости природно-технических геосистем и региональном опыте строительства, способны существенно снизить стоимость создания и эксплуатации объекта и предотвратить экологический ущерб.

В число основных задач мониторинга на этапе проектирования входят выявление опасных процессов (актуализация результатов литодинамических исследований), организация сети наблюдений (профили, площадки и пр.), количественная оценка динамики берега, предварительный прогноз (ориентировочный, качественный) развития опасных процессов, выработка рекомендаций для строительства, в т.ч. по минимизации воздействия на окружающую среду. На этапах строительства и эксплуатации сооружений большую роль в развитии экзогенных процессов начинает играть техногенный фактор, особенно на участках непосредственного производства строительных работ — выемка грунта, нарушения поверхностного стока, уничтожение почвенно-растительного покрова и пр. В связи с этим производственный мониторинг направлен, прежде всего, на оценку влияния строительства на развитие береговых процессов, оборудование дополнительных полигонов, сетей мониторинга и количественную оценку динамики берега при помощи инструментальных измерений. Разработка прогноза (детального, количественного) развития берега ведется с учетом влияния строительства на весь период эксплуатации сооружений, при необходимости вырабатываются рекомендации по разработке берегозащитных мероприятий, защите инженерных объектов, предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Учитываются природные условия и факторы, в которых будут работать сооружения, включая расчетные показатели волнения, колебаний уровня моря, ледовых воздействий, транспорта наносов и течений различной природы.

Большинство задач, возникающих при изучении экзогенных процессов в береговой зоне, не могут быть решены с помощью одного метода исследования. Характер и интенсивность береговых процессов в естественных условиях определяются, главным образом, гео-криологическими (льдистость отложений, наличие пластово-жильных льдов), гидрометеорологическими (ветровое волнение, морские льды, приливы и штормовые нагоны) и литолого-геоморфологическими (состав отложений, уклоны подводного склона, морфология береговых уступов) факторами. Соответственно научную и методологическую основу исследований составляют различные разделы естественных наук — геоморфология морских берегов, гидрология, метеорология, четвертичная геология, гео-криология и др. [7, 11, 14].

В изучаемых явлениях принято выделять два основных направления. Первое заключается в исследовании особенностей перемещения наносов под влиянием гидродинамических и других факторов, второе — в изучении и анализе геолого-геоморфологических результатов (морфология и динамика различных форм рельефа) деятельности экзогенных процессов. В соответствии с этим научно-производственный процесс получения информации включает широкий перечень применяемых методов, в число которых входят геодезические, геофизические, картографические, инженерно-геологические и др. Используется современная приборная база, технические средства и технологии накопления, обработки и представления информации.

Существует немало классификаций, разделяющих методы исследований экзогенных процессов по группам и видам на прямые и косвенные, теоретические и практические, аналитические, экспериментальные и натурные, дистанционные и полевые, инженерно-геологические, геофизические и пр. Авторы статьи не ставили цель усложнить или обобщить сложившиеся представления. В работе рассмотрены методы, которые, на взгляд авторов, наиболее часто и успешно применяются при решении широкого круга прикладных инженерных задач.

Прежде всего, следует отметить методы получения исходной информации о проявлениях и развитии береговых

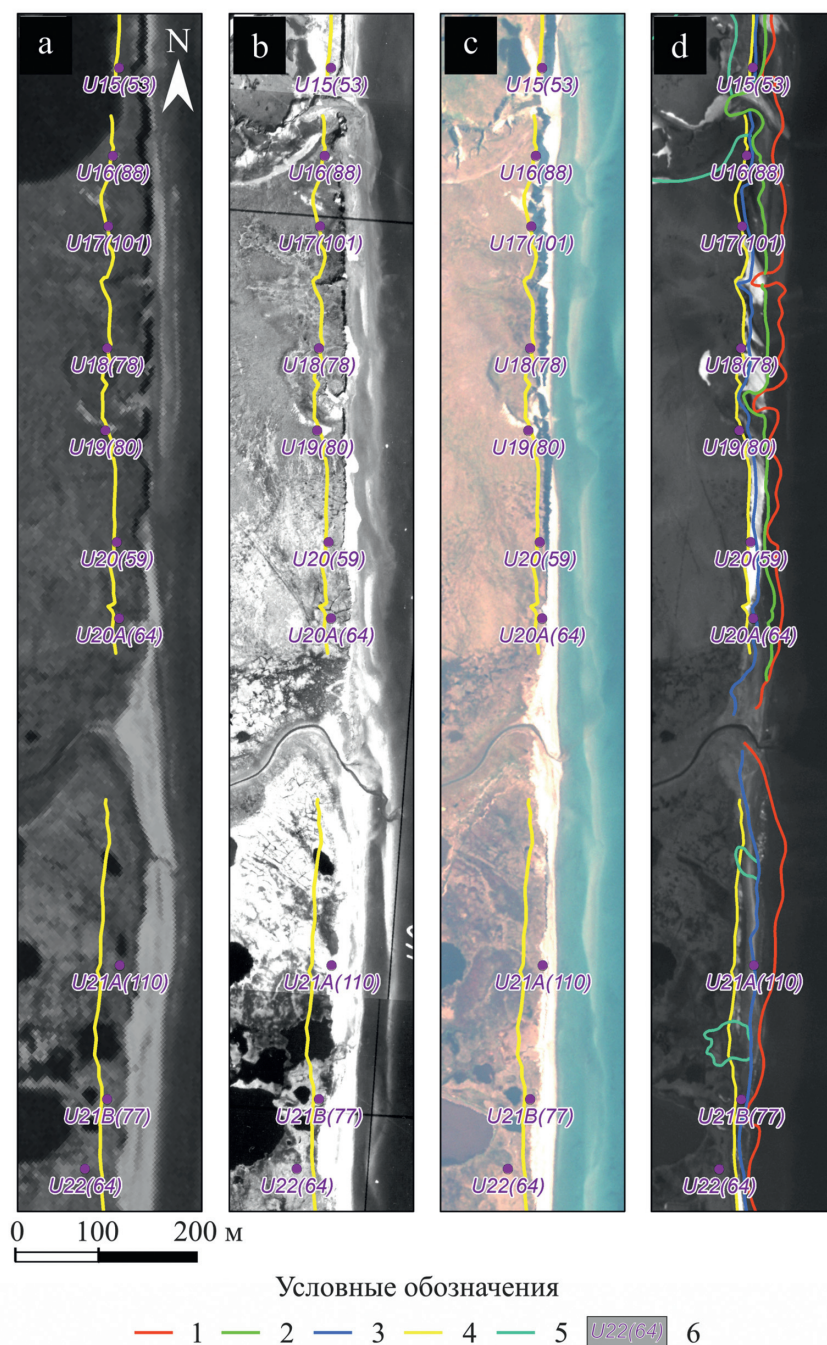


Рис. 1. Пример анализа положения береговой линии Уральского берега Байдаратской губы Карского моря в различные годы на основе: а — снимка космической программы Corona 1964 г.; б — аэрофотоснимка 1988 г.; в — снимка со спутника QuickBird 2005 г.; д — снимка со спутника Formosat-2 2012 г. [20]. Обозначения: береговая линия в различные годы: 1 — 1964 г.; 2 — 1988 г.; 3 — 2005 г.; 4 — 2012 г.; 5 — контуры спущенных в результате отступления берега озер; 6 — номера профилей мониторинга динамики берегов, в скобках — величина отступа берега за 1964–2012 гг., м

Fig. 1. Example of analysis of the coastline position of the Ural coast (Baydaratskaya Bay, Kara Sea) in various years based on: а — Corona program image, 1964; б — aerial photo, 1988; в — QuickBird satellite image, 2005; д — Formosat-2 satellite image, 2012 [20]. Designations: coastline in various years: 1 — 1964; 2 — 1988; 3 — 2005; 4 — 2012; 5 — contours of lakes drained as a result of coastal retreat; 6 — numbers of coastal dynamics monitoring profiles, in brackets — value of coastal retreat for 1964–2012, m

процессов (во времени), применяемые непосредственно при проведении инженерных работ и повторных наблюдениях. Многообразие таких методов объясняется, с одной стороны, большим

числом задач, решаемых с их помощью, и разнообразием природных условий, а с другой — постоянным совершенствованием оборудования и технологий, используемых для получения первичных

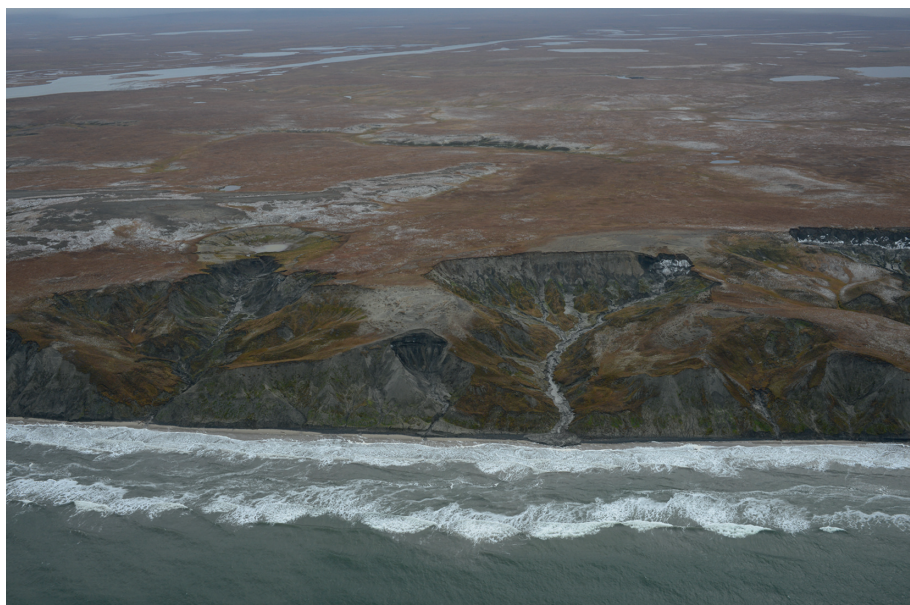


Рис. 2. Пример фотоматериалов, полученных в ходе специализированных авиационных исследований берегов Карского моря (термоцирки в местах выхода подземных льдов, район п. Амдерма, Ненецкий автономный округ)

Fig. 2. Example of photographic materials obtained during specialized aviation surveys of the Kara Sea coasts (thermocars in places of underground ice outlet, Amderma Settlement, Nenets Autonomous Okrug)

данных и их обработки. Представленные ниже методы или их совокупность позволяют проводить описание (морфологическое и морфометрическое), сравнительный анализ и районирование, оценку опасности, моделирование и прогноз развития береговых процессов.

С учетом труднодоступности и слабостью изученности многих береговых районов Арктики одним из наиболее доступных источников информации на сегодняшний день являются данные дистанционного зондирования Земли. Дешифрирование и анализ разновременных космических снимков, совмещенный анализ положения береговой линии в различные годы (рис. 1), расчет скоростей перемещения береговой линии и мониторинг ежегодных (сезонных) изменений рельефа береговой зоны — вот далеко не полный перечень задач, которые решаются дистанционными методами исследований [18]. Спутниковый мониторинг является сегодня одним из самых востребованных методов контроля текущей ледовой обстановки, экологического состояния территории (нефтяных разливов и пр.).

Для решения многих вопросов морфологии и динамики береговой зоны исключительно ценную информацию дают аэровизуальные наблюдения и аэрофотосъемка разных видов (плановая, перспективная и др.). Специальные авиасъемки берегов, выполняемые с применением самолетов-лабораторий,

оборудованных современным фото- и видеооборудованием, позволяют получать изображения различного масштаба. Высокая информативность материалов обусловлена возможностью съемки берегов с различных ракурсов и с различной высоты (рис. 2), а высокое разрешение снимков позволяет выявлять участки развития опасных процессов, термоцирков и многое другое. С самолета хорошо прослеживаются малейшие изгибы береговой линии, структура обрывов, оползни разных типов, плановое расположение дюн и дефляционных котловин, выходов дочетвертичных отложений и пластовых льдов. Фиксации поддаются многие важные детали, как, например, асимметрия выступов береговой линии и пляжей, заполняющих промежуточные вогнутости, что является дополнительным признаком преобладающего перемещения наносов, характер устьев малых рек, их отклонение по ходу берегового потока наносов, форма и параметры дельтовых накоплений, подводных валов и др. Кроме того, перспективные аэрофотоснимки являются весьма наглядными иллюстрациями к отчетам.

Еще одним источником сведений о берегах все чаще выступают данные, получаемые с применением беспилотных летательных аппаратов. Преимущества их использования заключаются в возможности площадной съемки местности с небольших высот, значи-

тельный охват территории, включая труднодоступные участки, а также скорость выполнения работ, точность измерений (пространственное разрешение 3–5 см) и возможность быстрой обработки данных и получения высокодетальных цифровых моделей рельефа рассматриваемой территории [19].

Несмотря на развитие технологий, мониторинг динамики берегов и экзогенных процессов по-прежнему предполагает проведение полевых работ. Маршрутные геоморфологические обследования (съемки), исследования форм рельефа, состава и строения отложений, опасных процессов и явлений, инструментальные (геодезические) работы на профилях сети мониторинга и/или стационарных площадках, а также гидрографические и геофизические работы на акватории позволяют получать фактические данные, необходимые при выборе проектных решений и оценке граничных условий безопасной эксплуатации инженерных сооружений. В условиях ярко выраженной сезонности проявления экзогенных геологических процессов и плохой сохранности деформаций в течение года полевые исследования рекомендуется выполнять дважды в год: сразу после освобождения акватории ото льда и в конце теплого сезона года, в период максимальной оттайки отложений. После особенно сильных штормов редкой повторяемости (более 7–8 баллов) проводятся повторное обследование для фиксации разрушений берега, в т.ч. пляжа и осмотр гидротехнических сооружений. В зимний период рекомендуется проводить наблюдения за припайными льдами и их рельефообразующей деятельностью.

Натурные наблюдения обеспечивают получение детальных сведений о компонентах природной среды [3, 8]. Фактические данные о скорости разрушения берега и отступления береговой линии (берегового уступа) позволяют рассчитать ее положение в будущем и снизить риски повреждения сооружений [2, 6]. Следует подчеркнуть, что именно определение многолетних деформаций (колебаний) в системе наблюдаемых параметров и долговременных тенденций развития экзогенных процессов позволяет выполнять качественную и количественную прогнозную оценку (рис. 3), вырабатывать рекомендации для строительства и хозяйственной деятельности. Достоверность прогнозной оценки будет возрастать с

увеличением продолжительности мониторинга (ряда наблюдений) за динамикой берегов и накоплением фактических сведений.

В получении репрезентативных данных большую роль играют точность измерений на профилях мониторинга и протяженность сети мониторинга, которая должна охватывать не только участок проектирования, но и прилегающие береговые районы в пределах единой литодинамической системы или их серии. Так, сеть мониторинга на Уральском берегу Байдарацкой губы Карского моря, организованная сотрудниками лаборатории геоэкологии Севера Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в 1988 г., имеет протяженность 22 км и включает несколько десятков поперечных профилей.

Изучение динамики наносов осуществляется различными методами в зависимости от типа гидротехнических сооружений, состава и свойств донных осадков и особенностей гидродинамического режима в изучаемом регионе. Как правило, применяются натурные наблюдения, лабораторное (гидравлическое) моделирование и расчетные методы. При натурных наблюдениях могут регистрироваться условия начала размыва дна, величины концентрации и расхода взвешенных наносов. Условия начала размыва дна обычно регистрируют с помощью подводной видеосъемки. Измерения концентрации взвешенных наносов проводят с использованием мутномеров, основанных на различных способах измерения концентрации взвеси, а также батометров-наносонакопителей различных конструкций. Измерения расхода взвешенных наносов выполняют с помощью измерительных комплексов, включающих в себя измерители концентрации взвеси, а также измерители скорости и направления течения.

Для оценки динамики несвязных осадков применяются различные расчетные методы, описывающие условия начала движения частиц несвязного грунта, расход наносов, переносимых в виде влечения по дну, концентрацию и расход взвешенных наносов. Точность прогноза концентрации и расхода взвешенных наносов может быть существенно повышена при региональной адаптации расчетных зависимостей, выполняемой с использованием натурных измерений, проведенных в конкретном регионе.

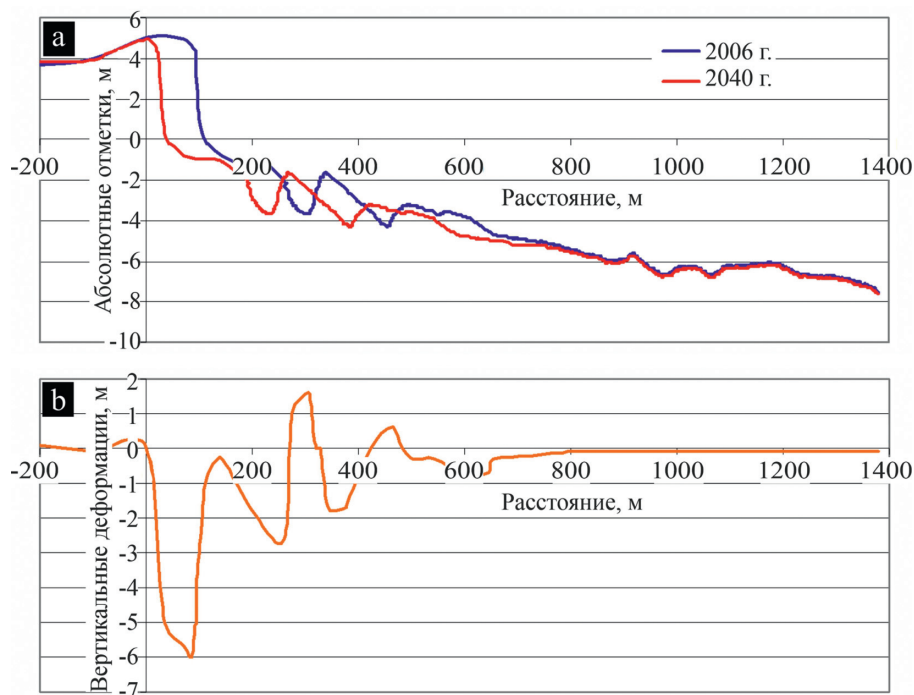


Рис. 3. Пример прогноза динамики береговой зоны на ключевом участке мониторинга (начало отсчета — пикет «0»): а — динамика профиля; б — вертикальные деформации профиля

Fig. 3. Example of forecasting the dynamics of the coastal zone at a key monitoring site (the beginning of the countdown is the picket «0»): а — profile dynamics; б — vertical profile deformations

Обоснованные региональные зависимости для оценки условий размыва дна, расчета концентрации и расхода взвешенных наносов, оценки условий осаждения и консолидации таких наносов могут быть получены только на основе комплексных натурных и лабораторных исследований. Эти работы должны выполняться организациями, располагающими необходимой экспериментальной базой и имеющими соответствующий опыт.

Изучение рельефа дна геофизическими методами (многолучевое эхолотирование, гидролокация бокового обзора) позволяет наряду с построением планов и профилей деформаций определять глубину проникновения килей ледяных образований в грунт и рассчитывать необходимую величину заглубления трубопроводов и кабелей связи, разрабатывать меры по защите инженерных объектов (рис. 4).

Анализ получаемых геофизическими методами данных наряду с глубиной экзакции позволяет проводить оценку интенсивности воздействий морских льдов на различные участки дна на всем протяжении проектируемых подводных сооружений (рис. 5). На участке мониторинга дна Байдарацкой губы Карского моря такая оценка

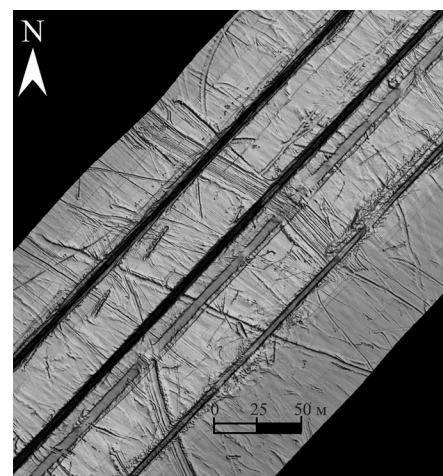


Рис. 4. Пример изображения дна Байдарацкой губы Карского моря на участке мониторинга. Многолучевое эхолотирование, 2011 г.

Fig. 4. Example of an image of the Baydaratskaya Bay bottom, Kara Sea at the monitoring site. Multibeam echo-sounder survey, 2011

позволила установить, что абсолютно вся площадь дна подвержена воздействиям морских льдов. Борозды ледового выпаживания достигают глубины 2 м и ширины 50 м, а их протяженность — нескольких километров. Их ориентировка, как правило, совпадает с генеральным направлением приливо-

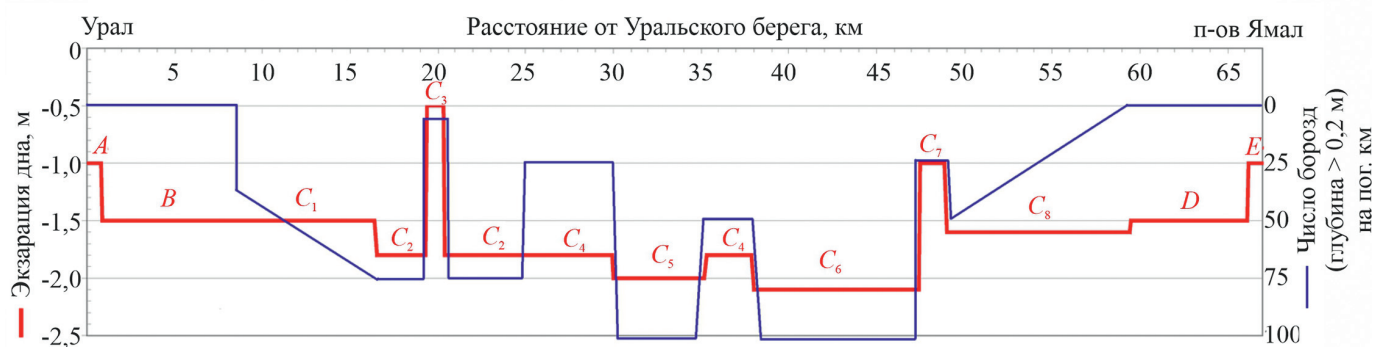


Рис. 5. Пример оценки интенсивности ледовой экзарации на участке мониторинга дна Байдарацкой губы Карского моря [12]. Обозначения: A, B, C₁–C₈, D, E — сегменты дна с различной интенсивностью ледовой экзарации

Fig. 5. Example of estimating the intensity of ice exaration at the bottom monitoring site of the Baydaratskaya Bay, Kara Sea [12]. Designations: A, B, C₁–C₈, D, E — bottom segments with different intensity of ice exaration

отливных течений. Нередко борозды пересекают траншеи трубопроводов, что хорошо заметно на получаемых изображениях дна (см. рис. 4).

Наибольшая интенсивность воздействия морских льдов на дно отмечается вдоль зимней кромки припая и сопряженного с ним участка дрейфующих льдов. С глубиной моря «срок жизни» микрорельефа увеличивается и борозды выпахивания могут существовать десятки лет. В результате площадь покрытия дна этими формами на некоторых участках составляет 100%. Это затрудняет работы по ежегодному мониторингу ледово-экзарационных процессов, обуславливая необходимость детального сравнительного анализа материалов съемки с данными прошлых лет для выявления «новых» борозд выпахивания на фоне существующего экзарационного микрорельефа дна.

На участках морского дна, сложенного несвязными осадками, при высокой интенсивности литодинамических процессов применение эхолотирования и гидролокации бокового обзора не всегда позволяет достоверно оценить глубины экзарации. Морфометрические характеристики борозд могут быть получены с использованием водолазных обследований и методом разбуривания стамух с ледового припая. Прогнозная оценка должна осуществляться на основе комплексного анализа сведений о морфологии и динамике рельефа дна, составе и свойствах осадков верхней части разреза донных отложений, сведениях о зарегистрированных в исследуемом районе параметрах борозд с применением математического моделирования.

Современная спутниковая геодезическая и геофизическая аппаратура, беспилотные летательные и подводные

аппараты расширяют возможности традиционных методов исследований, повышают производительность и точность полевых работ. Закономерно улучшается качество получаемой информации, достоверность прогнозной оценки и, как следствие, повышается безопасность эксплуатации инженерных объектов. Важными результатами высокотехнологичных работ, к числу которых относится и набирающее популярность воздушное лазерное сканирование, становятся ортофотопланы, цифровые модели рельефа, трехмерные изображения, высокоточные измерения при мониторинге динамики берегов и сопряженных экзогенных процессов.

Процесс обработки информации на этапе камеральных работ сопровождается анализом гидрометеорологических данных. Это связано с необходимостью выявления и учета многолетних изменений термической и волноэнергетической составляющих гидрометеорологического потенциала, как важнейших факторов динамики берегов [13]. Современные прогнозы развития арктических берегов должны учитывать не только прогнозируемое повышение температуры воздуха, вызывающее широкий спектр процессов деградации многолетнемерзлых грунтов [4, 9], но и увеличение продолжительности безледного периода и изменения повторяемости штормов волноопасных румбов, вызывающих наиболее значительные деформации в береговой зоне. Этому будет способствовать рост экстремальности температуры и осадков, преимущественно в холодный период и весной, и уже наметившаяся тенденция увеличения частоты проникновения мощных североатлантических циклонов далеко на восток, приносящих резкие потепления и

большие суммы осадков [9]. Отсутствие такой оценки ведет к занижению рисков развития чрезвычайных ситуаций природного характера, что может негативно отразиться на безопасности сооружений.

Заключение

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что проведение мониторинга динамики берегов и сопряженных экзогенных процессов относится к важнейшим аспектам обеспечения промышленной и экологической безопасности морских сооружений. Результатом исследований, наряду с фактической оценкой состояния компонентов геологической среды и получением всех необходимых сведений, являются рекомендации по предупреждению и предотвращению неблагоприятных и чрезвычайных событий геологического и техногенного характера. Подобные рекомендации, основанные на анализе всех факторов устойчивости природно-технических геосистем и региональном опыте строительства, способны существенно снизить стоимость создания и эксплуатации объекта и предотвратить экологический ущерб.

Генеральные схемы и проекты берегозащитных сооружений, в случае их необходимости, должны быть обоснованы исследованиями динамики берегов и предусматривают организацию наблюдений за работой и состоянием берегозащитных сооружений на всех стадиях строительства и эксплуатации. Именно систематические выполняемые работы в составе инженерных изысканий и научных исследований позволяют четко определять проблемы и цели берегозащиты, разрабатывать эф-

фективные решения, способные не только обеспечить устойчивость территории, но и минимизировать возможные отрицательные последствия воздействия берегозащитного комплекса на природную среду. Оценка динамики береговой зоны моря в пределах защи-

щаемых участков побережья и на прилегающих территориях возможна только в результате повторных наблюдений, что определяет исключительное значение мониторинга. С целью снижения негативного влияния проекты берегозащитных сооружений, промышленная и

хозяйственная деятельность должны осуществляться с учетом всех аспектов рационального природопользования, учитывая природные закономерности развития и факторы устойчивости уязвимых к внешнему воздействию береговых систем. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арэ Ф.Э., 1980. Термоабразия морских берегов. Наука, Москва.
2. Арэ Ф.Э., 1985. Основы прогноза термоабразии берегов. Наука, Новосибирск.
3. Белова Н.Г., Шабанова Н.Н., Огородов С.А., Камалов А.М., Кузнецов Д.Е., Баранская А.В., Новикова А.В., 2017. Динамика термоабразионных берегов Карского моря в районе мыса Харасавэй (Западный Ямал). Криосфера Земли, Том XXI, № 6, с. 85–96, [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(85-96\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(85-96)).
4. Воскресенский К.С., 2001. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России, под ред. Ю.Г. Симонова. Изд-во МГУ, Москва.
5. Глуховский Б.Х. (ред.), 1993. Инженерно-гидрометеорологические изыскания на континентальном шельфе. Практическое руководство. Гидрометеиздат, Москва.
6. Ермолов А.А., Прядилин Р.Ю., 2013. Особенности производственного мониторинга геологических и литодинамических процессов на участке строительства перехода магистральных газопроводов через Байдацкую губу Карского моря. Инженерные изыскания, № 10–11, с. 88–91.
7. Зенкович В.П., 1962. Основы учения о развитии морских берегов. Изд-во АН СССР, Москва.
8. Камалов А.М., Огородов С.А., Бирюков В.Ю., Совершаева Г.Д., Цвечинский А.С., Архипов В.В., Белова Н.Г., Носков А.И., Соломатин В.И., 2006. Морфолитодинамика берегов и дна Байдацкой губы на трассе перехода магистральными газопроводами. Криосфера Земли, Том XX, № 3, с. 3–14.
9. Кислов А.В., Аляутдинов А.Р., Баранская А.В., Белова Н.Г., Богатова Д.М., Викулина М.А., Железнова И.В., Суркова Г.В., Краев Г.Н., 2023. Прогноз изменений климата и интенсивности экзогенных процессов на территории Ямало-Ненецкого автономного округа. Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, Том 510, № 2, с. 233–240, <https://doi.org/10.31857/S2686739723600388>.
10. Костяницын М.Н., Логачев Л.А., Зенкович В.П. (ред.), 1975. Руководство по методам исследований и расчетов перемещения наносов и динамики берегов при инженерных изысканиях. Гидрометеиздат, Москва.
11. Леонтьев О.К., 1961. Основы геоморфологии морских берегов. Изд-во МГУ, Москва.
12. Огородов С.А., 2011. Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. Изд-во Московского университета, Москва.
13. Огородов С.А., Шабанова Н.Н., Кессель А.С., Баранская А.В., Разумов С.О., 2022. Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей Российской Арктики. Вестник Московского университета. Серия 5. География, № 1, с. 26–42.
14. Сафьянов Г.А., 1996. Геоморфология морских берегов. Изд-во МГУ, Москва.
15. Соломатин В.И. (ред.), 1988. Исследование устойчивости геосистем Севера. Изд-во Московского университета, Москва.
16. Соломатин В.И. (ред.), 1992. Геоэкология Севера (введение в геоэкоэкологию). Изд-во МГУ, Москва.
17. Соломатин В.И., Жигарев Л.А., Совершаев В.А., 1998. Криогенные процессы и явления на побережье и шельфе арктических морей. Динамика арктических побережий России, под ред. В.И. Соломатина, В.А. Совершаева, И.И. Мазура. Изд-во МГУ, Москва, с. 12–18.
18. Belova N., Ermolov A., Novikova A., Ogorodov S., Stanilovskaya Y., 2023. Dynamics of low-lying sandy coast of the Gydan Peninsula, Kara Sea, Russia, based on multi-temporal remote sensing data. Remote Sensing, Vol. 15, No. 1, ID 48, <https://doi.org/10.3390/rs15010048>.
19. Novikova A.V., Vergun A.P., Zelenin E.A., Baranskaya A.V., Ogorodov S.A., 2021. Determining dynamics of the Kara Sea coasts using remote sensing and UAV data: a case study. Russian Journal of Earth Sciences, Vol. 21, No. 3, ID ES3004, <https://doi.org/10.2205/2020ES000743>.
20. Ogorodov S.A., Baranskaya A.V., Belova N.G., Kamalov A.M., Kuznetsov D.E., Overduin P.P., Shabanova N.N., Vergun A.P., 2016. Coastal dynamics of the Pechora and Kara Seas under changing climatic conditions and human disturbances. Geography, Environment, Sustainability, Vol. 9, No. 3, pp. 53–73, https://doi.org/10.15356/2071-9388_03v09_2016_04.

REFERENCES

1. Are F.E., 1980. Thermal abrasion of sea coasts. Nauka, Moscow. (in Russian)
2. Are F.E., 1985. Basics of forecasting shore thermoabrasion. Nauka, Novosibirsk. (in Russian)

3. Belova N.G., Shabanova N.N., Ogorodov S.A., Kamalov A.M., Kuznetsov D.E., Baranskaya A.V., Novikova A.V., 2017. Erosion of permafrost coasts of Kara Sea near Kharasavey Cape, Western Yamal. *Kriosfera Zemli*, Vol. XXI, No. 6, pp. 85–96, [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(85-96\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(85-96)). (in Russian)
4. Voskresensky K.S., 2001. Modern relief-forming processes on the plains of the North of Russia, in Yu.G. Simonov (ed.). Publishing house of the Moscow State University, Moscow. (in Russian)
5. Glukhovskiy B.Kh. (ed.), 1993. Engineering-hydrometeorological surveys on the continental shelf. Practical guide. *Gidrometeoizdat*, Moscow. (in Russian)
6. Ermolov A.A., Pryadilin R.Yu., 2013. Features of production monitoring of geological processes and bottom relief dynamics in the area of construction of main gas pipelines crossing across the Baydarata Bay of the Kara Sea. *Engineering Surveys*, No. 10–11, pp. 88–91. (in Russian)
7. Zenkovich V.P., 1962. Fundamentals of the doctrine of the sea coast development. Publishing house of the USSR Academy of Sciences, Moscow. (in Russian)
8. Kamalov A.M., Ogorodov S.A., Biryukov V.Yu., Sovershaeva G.D., Tsvetsinsky A.S., Arkhipov V.V., Belova N.G., Noskov A.I., Solomatin V.I., 2006. Coastal and seabed morpholithodynamics of the Baydaratskaya Bay at the route of crossing by main gas pipelines. *Kriosfera Zemli*, Vol. 10, No. 3, pp. 3–14. (in Russian)
9. Kislov A.V., Alyautdinov A.R., Baranskaya A.V., Belova N.G., Bogatova D.M., Vikulina M.A., Zheleznova I.V., Surkova G.V., Kraev G.N., 2023. Projection of climate change and the intensity of exogenous processes on the territory of the Yamalo-Nenets Autonomous District. *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk. Nauki o Zemle*, Vol. 510, No. 2, pp. 233–240, <https://doi.org/10.31857/S2686739723600388>. (in Russian)
10. Kostyanitsyn M.N., Logachev L.A., Zenkovich V.P. (eds), 1975. Guide to methods of research and calculations of sediment movement and coastal dynamics during engineering surveys. *Gidrometeoizdat*, Moscow. (in Russian)
11. Leontiev O.K., 1961. Fundamentals of sea coasts geomorphology. Publishing house of the Moscow State University, Moscow. (in Russian)
12. Ogorodov S.A., 2011. Role of sea ice in the dynamics of the of the coastal zone geomorphology. Publishing house of the Moscow State University, Moscow. (in Russian)
13. Ogorodov S.A., Shabanova N.N., Kessel A.S., Baranskaya A.V., Razumov S.O., 2022. Changes of the hydrometeorological potential of thermoabrasion on the Russian Arctic sea coasts. *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*, No. 1, pp. 26–42. (in Russian)
14. Safyanov G.A., 1996. Geomorphology of sea coasts. Publishing house of the Moscow State University, Moscow. (in Russian)
15. Solomatin V.I. (ed.), 1988. Study of the stability of the North geosystems. Publishing house of the Moscow State University, Moscow. (in Russian)
16. Solomatin V.I. (ed.), 1992. Geocology of the North (introduction to geocryoeology). Publishing house of the Moscow State University, Moscow. (in Russian)
17. Solomatin V.I., Zhigarev L.A., Sovershaev V.A., 1998. Cryogenic processes and phenomena on the coast and shelf of the Arctic seas. Dynamics of the Arctic coasts of Russia, in V.I. Solomatin, V.A. Sovershaev, I.I. Mazur (eds). Publishing house of the Moscow State University, Moscow, pp. 12–18. (in Russian)
18. Belova N., Ermolov A., Novikova A., Ogorodov S., Stanilovskaya Y., 2023. Dynamics of low-lying sandy coast of the Gydan Peninsula, Kara Sea, Russia, based on multi-temporal remote sensing data. *Remote Sensing*, Vol. 15, No. 1, ID 48, <https://doi.org/10.3390/rs15010048>.
19. Novikova A.V., Vergun A.P., Zelenin E.A., Baranskaya A.V., Ogorodov S.A., 2021. Determining dynamics of the Kara Sea coasts using remote sensing and UAV data: a case study. *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 21, No. 3, ID ES3004, <https://doi.org/10.2205/2020ES000743>.
20. Ogorodov S.A., Baranskaya A.V., Belova N.G., Kamalov A.M., Kuznetsov D.E., Overduin P.P., Shabanova N.N., Vergun A.P., 2016. Coastal dynamics of the Pechora and Kara Seas under changing climatic conditions and human disturbances. *Geography, Environment, Sustainability*, Vol. 9, No. 3, pp. 53–73, https://doi.org/10.15356/2071-9388_03v09_2016_04.

Информация об авторах

ЕРМОЛОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

Научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории геоэкологии Севера географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.н., г. Москва, Россия

ОГОРОДОВ СТАНИСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ

Заведующий, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории геоэкологии Севера географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.г.н., профессор РАН, г. Москва, Россия

Information about the authors

ALEXANDER A. ERMOLOV

PhD (Geography); Research Scientist in the Research Laboratory of Geocology of the North, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia

STANISLAV A. OGORODOV

DSc (Geography); Head, Chief Research Scientist in the Research Laboratory of Geocology of the North, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University; Professor in the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia