

Космические снимки в новом Атласе «Российская Арктика»

© 2019 г. В.И. Кравцова*, Е.И. Пижанкова, А.И. Кизяков, А.В. Гаврилов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*valentinamsu@yandex.ru

Satellite images in the new Atlas «Russian Arctic»

V.I. Kravtsova*, E.I. Pizhankova, A.I. Kizyakov, A.V. Gavrilov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*valentinamsu@yandex.ru

Received August 12, 2018 / Revised December 27, 2018 / Accepted March 22, 2019

Keywords: atlas, Earth exploration, industrial impact, landscape, permafrost, river mouths, satellite images, sea ice, shores.**Summary**

The increasing interest in the Arctic promotes appearance of new cartographic products to provide information for the primary tasks of this region development. So, several atlases of the Arctic have been already published. At the initiative and with the financial support from the oil and gas industry, a new Atlas «Russian Arctic» is being prepared for publication, in which considerable attention is given to the environmental aspects of the development of the North with account for conditions of changing climate. Unlike previous atlases, this Atlas contains thematic sets of satellite images reflecting changes in the natural environment, in particular, different types of natural ice under conditions of warming. The space part of the Atlas developed by the authors of this article covers a number of subjects. Thus, the decrease in the area of sea ice is illustrated by the materials of shooting from the space of the Northern polar cap for the period of the largest reduction in the area. Images made in different time fix retreating of the shores, composed of underground ice, being the result of the processes of thermal abrasion, thermal erosion and thermal denudation. Complicated ice conditions of navigation in the Ob Bay and characteristics of the Arctic rivers mouths are presented by pictures of tidal estuaries of the rivers Mezen and Kuloi. Images of ice jams at the mouth of the Northern Dvina River and materials of space monitoring of measures for liquidation of them are also given in the Atlas. Special attention is given to forms of permafrost relief, which are well displayed in high-resolution images. They show a polygonal micro-relief of different types and stages of development of them, as well as frost mounds, dales, and thermo-erosion forms. Formation of aufeis (naleds), thermokarst lakes, and craters of gas outbursts is also shown. The wildlife of the Arctic is represented in the Atlas as well. The pictures present a visual image of different types of tundra. The influence of warming on vegetation development is well reflected in the photo map of the dynamics of the vegetation index for 2000–2009, showing the growth of phytomass in the European North. The Atlas contains unique materials of satellite monitoring of Arctic mammals – walruses and seals. The impact of using mineral resources on the vulnerable nature of the Arctic is shown in the Khibiny region. Prominent examples of the vegetation degradation in the areas of Norilsk and Monchegorsk cities are given, where technogenic wastelands have been formed under the sulfuric acid fumes of the copper-nickel plants.

Citation: Kravtsova V.I., Pizhankova E.I., Kizyakov A.I., Gavrilov A.V. Satellite images in the new Atlas «Russian Arctic». *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 59 (3): 411–422. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-384>.

Поступила 12 августа 2018 г. / После доработки 27 декабря 2018 г. / Принята к печати 22 марта 2019 г.

Ключевые слова: атлас, берега, космические снимки, ландшафт, многолетняя мерзлота, морской лёд, недропользование, промышленное воздействие, устья рек.

Представлено космическое оснащение нового Атласа «Российская Арктика». Включённые в атлас космические снимки отражают изменения в районах криолитозоны, насыщенных разными видами природных льдов, остро реагирующих на потепление климата и освоение территории. Снимки группируются по темам: морские льды, берега северных морей, устьевые области арктических рек, многолетняя мерзлота, ландшафты, биота, недропользование, промышленное воздействие на экосистемы.

Введение

Всё возрастающий интерес к Арктике способствует расширению научных исследований её территории и подготовке картографических произведений для информационного обеспечения

первостепенных задач по развитию этого региона. Многоплановую информацию содержат собрания карт в виде атласов. К настоящему времени создано несколько атласов Арктики разного назначения.

Результаты изучения Арктики впервые были обобщены и представлены в фундаментальном

научно-справочном «Атласе Арктики», изданном картографической службой страны в 1985 г. В него вошло около 350 карт широкой тематики, характеризующих в основном геологическое строение, климат, ледники, многолетнюю мерзлоту, воды, растительность и животный мир этой территории и в меньшей степени — историю, хозяйство и население [1]. Открытие ресурсов шельфа северных морей, активное хозяйственное освоение Арктики, возникшие экологические проблемы, связанные с потеплением климата и антропогенным воздействием, обусловили новый виток атласного картографирования этого региона в начале XXI в. В 2013 г. на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова разработан и выпущен атлас «Российская Арктика в XXI веке: природные условия и риски освоения», ориентированный главным образом на цели образования [2]. В этом атласе были отражены не только современное геоэкологическое состояние региона, но и его возможные изменения на период до 2050 г.

В 2017 г. вышел в свет «Национальный атлас Арктики», имеющий информационно-справочный и научно-прикладной характер, созданный по поручению Президента и Правительства и по заказу Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии, подготовленный и изданный АО «Роскартография». В его разработке участвовали более 100 ведущих специалистов из 23 научно-исследовательских, высших учебных и производственных организаций, 12 министерств и ведомств [3]. Он представляет собой свод пространственно-временной информации о географических, климатических, экологических, экономических, культурологических и социальных особенностях Арктической зоны Российской Федерации. В этот атлас, наряду с общегеографическими картами, включено несколько обзорных космических фотокарт Арктики в целом и её отдельных районов; космические снимки используются также в качестве иллюстраций к текстовым материалам. Имеется специальный раздел «Исследования Арктики космическими методами», характеризующий площади покрытия космической съёмкой с примерами снимков разных сенсоров, их автоматизированного дешифрирования и освещающий перспективы развития новых съёмочных систем. Однако специальной тематической гляциологи-

ческой нагрузки космические снимки в этом атласе не несут.

В связи с особым вниманием к природным ресурсам Севера, по инициативе и при финансовой поддержке газовой-нефтяного комплекса, ООО «Феория», с привлечением ряда факультетов МГУ имени М.В. Ломоносова, в настоящее время ведётся разработка Атласа «Российская Арктика», отвечающего специфике деятельности компании «Роснефть». В этом атласе значительное внимание уделяется экологическим аспектам освоения Севера в условиях колебаний климата. В него включён специальный раздел о деятельности национальной компании «Роснефть» в Российской Арктике. В новом атласе будут космические снимки, отражающие изменение природной среды при потеплении климата и освоении территории, а также возникающие при этом экологические проблемы.

В отличие от «Национального атласа Арктики» космические снимки используются в новом атласе не как иллюстрации к тексту или обзорные карты, а раскрывают определённые темы, среди которых: вызванное потеплением сокращение площади морских льдов и его влияние на состояние берегов; развитие форм мерзлотного рельефа и состояние многолетней мерзлоты в условиях потепления и антропогенного воздействия; ледовые транспортные условия в устьях арктических рек; изменения продуктивности фитомассы при потеплении; промышленное воздействие на ранимые экосистемы Севера. В виде снимков представлены уникальные материалы впервые организованного спутникового мониторинга млекопитающих, мониторинга чрезвычайных ситуаций — заторов льда в устьях рек.

Космическое оснащение атласа разработано сотрудниками МГУ имени М.В. Ломоносова — авторами настоящей статьи. Снимками охвачен широкий круг объектов — от арктических морей, их берегов, мерзлотных форм рельефа криолитозоны, природных ландшафтов северных окраин континента до воздействия на них при разработке недр и хозяйственном освоении территорий, но особое внимание уделяется изменениям различных видов природных льдов при потеплении. Снимки сопровождаются краткими пояснительными текстами, раскрывающими существо отображаемых объектов и явлений и рассчитанными на широкого читателя.

Используемые материалы и методы

Как уже отмечалось, в атлас включены материалы космической съёмки разных типов. Для явлений глобального масштаба использованы обзорные снимки малого, километрового разрешения, например Terra/MODIS и их сочленения в глобальные или крупнорегиональные покрытия, такие, как Северная Евразия. Региональные объекты – участки морей, острова, дельты рек, воздействие на природную среду в крупных промышленных районах – показаны на снимках относительно высокого разрешения, в первые десятки метров, со спутников Landsat, SPOT. Детали земной поверхности, формы мерзлотного микрорельефа, их развитие и деградация при потеплении, хозяйственное освоение территории, объекты живой природы отображаются на детальных снимках сверхвысокого, метрового, разрешения со спутников Ikonos, QuickBird, GeoEye, в том числе включённых в информационную систему GoogleEarth. Таких снимков в атласе большинство. Для расширения периода ретроспективного анализа привлечены аэрофотоснимки, полученные до начала космических съёмки.

В атлас включены преимущественно снимки в видимом диапазоне спектра – цветные синтезированные в цветах, близких к естественной цветопередаче, что важно для широкого читателя. Показаны также и снимки в радиодиапазоне – радиолокационные снимки со спутника Radarsat, незаменимые для мониторинга ледовых объектов, например, заторов льда на реках независимо от условий облачности, и микроволновые радиометрические снимки со спутников Nimbus, DMSP – главное средство мониторинга сокращения полярной шапки морских льдов.

В соответствии с одной из основных целей космического оснащения атласа – дополнения его визуальными образами Арктики – в большинстве случаев приводятся необработанные снимки, передающие реальную картину природы и рассчитанные на визуальное восприятие, а их текстовое сопровождение отражает результаты их визуального дешифрирования. Для определения изменений, например, динамики берегов, использованы результаты автоматизированной обработки разновременных снимков. С целью оценки трансформации северной растительности при потеплении климата выполнен

автоматизированный анализ изменений рассчитываемого по снимкам показателя – вегетационного индекса, отражающего рост фитомассы.

Результаты и их обсуждение

Космические снимки сопровождают ряд разделов атласа. В разделе «Моря. Северный Ледовитый океан» они характеризуют распространение морских льдов, документально подтверждая сокращение площади полярной шапки льда при потеплении климата и изменение ледовых условий у берегов, что способствует их разрушению. В гидрологическом разделе атласа космические снимки показывают особенности устьевых областей арктических рек, в том числе ледовые заторы, препятствующие работе водного транспорта и вызывающие наводнения, для контроля которых организуется космический мониторинг. Раздел атласа «Криолитозона» сопровождается широким и разнообразным спектром космических снимков, характеризующих развитие особых форм поверхности в зонах многолетней мерзлоты – полигональных структур, бугров пучения, деллей, термокарстовых котловин и озёр, воронок газового выброса. Такие снимки дополняют карты «Многолетняя мерзлота», «Опасные мерзлотные процессы», «Строительство и промышленная деятельность в условиях многолетней мерзлоты».

В разделе атласа «Растительность и животный мир» приведены снимки тундровых ландшафтов разных типов. В дополнение к геоботанической карте и карте биомов представлены результаты обработки разновременных космических снимков, показывающие изменение состояния тундровой растительности и её фитомассы при потеплении. В дополнение к большой группе карт животного мира приведены уникальные материалы спутникового мониторинга моржей и тюленей. В экологическом разделе атласа на снимках отражена деградация лесов в результате губительного для легкоранимой северной природы воздействия дымов медно-никелевых комбинатов в районах городов Норильска и Мончегорска. Экологические проблемы недропользования показаны на примере Кировского апатит-нефелинового рудника в Хибинах и добычи нефти на шельфе на морской стационарной платформе Приразломная; в обоих случаях предусматривается пре-

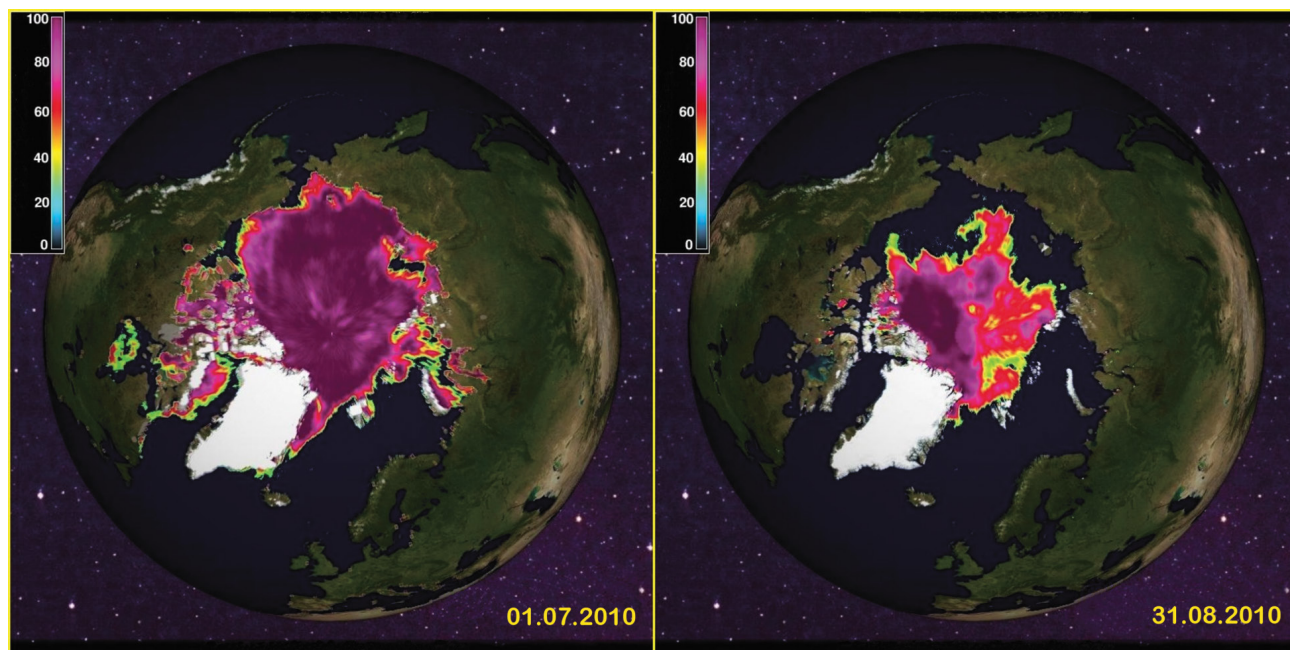


Рис. 1. Распространение морских льдов при концентрации более 30% в 2010 г. по данным спутника DMSP.

Цветная шкала – концентрация морского льда, %

Fig. 1. Coverage of sea ice with concentration more than 30% in 2010 by DMSP data.

Color scale – sea ice concentration, %

дотвращение загрязнения, а снимки помогают контролировать природозащитные мероприятия. Далее остановимся на космических материалах, представленных по названным темам.

Морские льды. Потепление климата в последние десятилетия привело к активному таянию морских льдов Северного Ледовитого океана, что существенно изменило условия судоходства по Северному морскому пути. Поэтому в атласе в дополнение к картам, характеризующим распространение морских льдов, приведены снимки, зафиксировавшие сокращение площади полярной шапки льда. Отражены также особенности прибрежных льдов, влияющих на изменение берегов северных морей при климатических колебаниях.

Полярная шапка льдов. Спутниковый мониторинг состояния морских льдов ведётся с 1970-х годов с помощью микроволновых радиометров, способных выполнять съёмку независимо от условий облачности и освещения. По данным микроволновых радиометров SMMR с американских спутников Nimbus и DMSP создаются ежедневные карты распространения морских льдов разной сплочённости. Включённые в атлас снимки Северного полушария, приведённые на рис. 1, показывают распространение морских льдов при

концентрации более 30% в 2010 г., когда летнее сокращение их площади было особенно значительным. В начале июля 2010 г. морской лёд частично закрывал акваторию Карского моря и почти полностью – моря Лаптевых и Восточно-Сибирского, а к концу августа 2010 г. моря Российской Арктики полностью очистились ото льда.

Припайный лёд. Припай, в течение 8–9 месяцев в году блокирующий берега в восточном секторе Российской Арктики, исключает волновое воздействие большую часть года и тем самым играет защитную роль в развитии морских берегов, сложенных многолетнемёрзлыми породами. Тем самым их термоабразивное разрушение происходит только в течение короткого лета и осени. Защитная роль припая проиллюстрирована в атласе июньским снимком со спутника Landsat, на котором голубая полоса припая шириной 50 км в Восточно-Сибирском море отделяет от берега открытую воду, имеющую чёрный цвет.

Дрейфующий лёд у берегов. Скопление у берегов льдов, дрейфующих в период открытой воды, ограничивает свободную акваторию, определяющую длину разгона волн и энергию волнения, препятствуя разрушению берегов. В атласе представлен снимок побережья Югорского по-

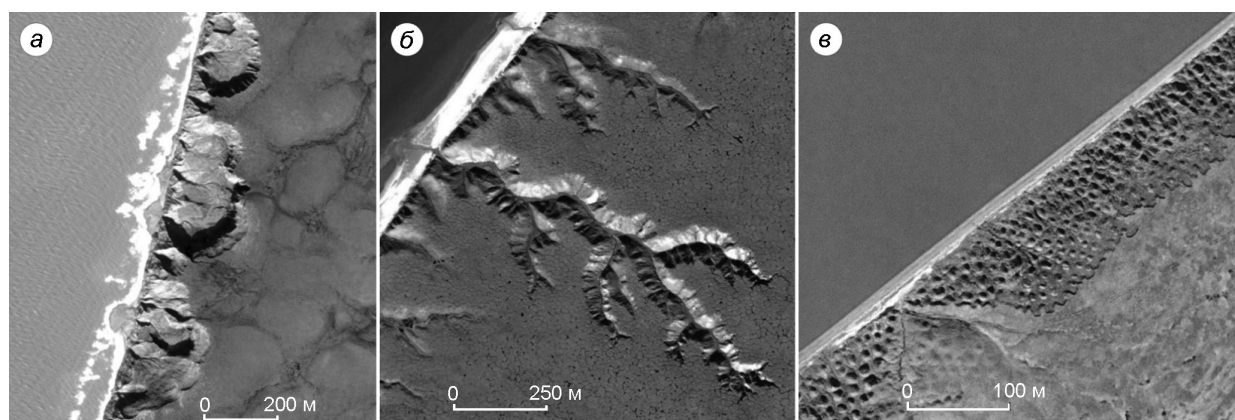


Рис. 2. Разрушение берегов, сложенных многолетнемёрзлыми породами:

a – термоцирки (о. Колгуев, Баренцево море); *б* – термоэрозионные формы (о. Айон); *в* – байджерахи (п-ов Быковский, море Лаптевых). Снимки со спутника GeoEye, 09.2009 г.

Fig. 2. Destruction of shores with permafrost rocks:

a – thermal cirques (Kolguev Island, Barents Sea); *b* – thermal erosion forms (Aion Island, East Siberian Sea); *v* – baidzherakhs (Bykovsky Peninsula, Laptev Sea). GeoEye images, 09.2009

луострова, на котором видны узкая полоса припайного льда и скопление дрейфующего льда, закрывающие большую часть акватории южной части Карского моря. Наблюдаемая ситуация определяет стабильность побережья до момента разрушения припая и освобождения акватории от дрейфующего льда.

Берега северных морей. В атласе проиллюстрированы разрушение и отступление морских берегов, сложенных подземными льдами, в результате активизации процессов термоабразии, термоэрозии и термоденудации при потеплении во второй половине XX – начале XXI в. На разновременных снимках зафиксировано отступление берегов и показаны проявления в рельефе основных деструктивных процессов – термоэрозионные формы, термоцирки, байджерахи.

Разрушение и отступление берегов. Разрушение берегов особенно заметно на островах северных морей и проиллюстрировано в атласе на примере о. Новая Сибирь в Восточно-Сибирском море, берега которого характеризуются высоким содержанием в горных породах подземных льдов разного происхождения. Несмотря на небольшой период открытой воды, когда активизируются береговые процессы, отступление ледяных берегов достигает значительных величин, скорость отступления составляет 5–10 м/год. Выполненное Е.И. Пижанковой сравнение результатов дешифрирования аэрофотоснимков 1952 г. и снимков со спутника

Landsat 2001 г. на участке восточного побережья о. Новая Сибирь вблизи устья р. Грязная показало, что максимальная величина отступления за 50-летний интервал времени составила 540 м, а скорость – 10,8 м/год. За последние полтора десятилетия (в XXI в.) скорость отступления ледяных берегов увеличилась более чем вдвое.

Береговые термоцирки. При вытаивании подземных залежей пластового льда образуются термоцирки – крупные циркообразные углубления, глубина которых может достигать 30–40 м, а ширина – первые сотни метров в зависимости от высоты берегового уступа и особенностей залегания пластового льда. На морских побережьях термоцирки способствуют интенсивному разрушению берегов. На рис. 2, *a* приведён снимок со спутника GeoEye с береговыми термоцирками на западном побережье о. Колгуев. Термоцирки, имеющие высокую скорость отступления бровки (до 15 м/год), представляют собой реальную опасность для хозяйственных объектов и транспортной инфраструктуры в осваиваемых районах Арктики.

Термоэрозия – ещё один процесс разрушения берегов. В результате теплового и механического воздействия текучих поверхностных вод на мёрзлые породы образуются промоины и овраги. Эрозионные формы рельефа хорошо дешифрируются на космических снимках побережья о. Айон (Восточно-Сибирское море) (см. рис. 2, *б*). Начальные эрозионные формы развиваются по сетке повторно-жильных льдов, в

результате чего формируется угловатый ортогональный рисунок овражной сети. Широкое распространение этого процесса осложняет хозяйственное освоение северных территорий.

Байдже́рахи. На разрушающемся берегу, сложенном отложениями, содержащими мощные повторно-жильные льды, образуются бугры — байдже́рахи. Они представляют собой слабо затронутые протаиванием останцы грунтовых блоков, разделённых глубокими понижениями на месте вытаявших под воздействием летних температур воздуха ледяных жил. Такие процессы на берегу п-ова Быковский, расположенного к юго-востоку от дельты р. Лена, показаны в атласе на примере снимка со спутника SPOT (см. рис. 2, в).

Устьевые области арктических рек. В атласе приведены снимки нескольких устьевых областей рек, наиболее важных в транспортном и энергетическом отношении.

Мезень и Кулой — реки, имеющие общую устьевую область эстуарного типа в юго-восточной части Мезенской губы — залива Белого моря. Из-за небольшого стока наносов Мезени и Кулой и сильных приливных течений в устье этих рек дельты не образуются. Режим обоих расширяющихся вниз по течению эстуариев почти полностью определяется сильным воздействием приливов. Скорости приливных течений в устье эстуария Мезени огромны — до 2–2,5 м/с. Приливная волна, двигаясь вверх по эстуарию, трансформируется, образуя «накат», и взмучивает наносы. В моменты максимальных скоростей приливных течений в придонных горизонтах создаётся так называемая «пробка мутности»; эта зона во время прилива перемещается вверх, а во время отлива — вниз по эстуарию. Данное явление удалось показать на приведённом в атласе снимке со спутника Landsat, где в нижней части эстуария отображён участок русла с повышенной яркостью изображения воды в результате резкого увеличения её мутности. Показать такое явление читателю атласа особенно интересно, так как рассматриваются проекты строительства в устьевой области Мезени приливной электростанции [6].

Обь — основная транспортная артерия Западной Сибири, и приведённые в атласе снимки отражают затруднённые условия судоходства в её устьевой области в связи с сложным ледовым режимом обширной Обь-Тазовской губы. Естественный навигационный период составля-

ет всего 70–90 суток; его приходится продлевать, используя ледоколы. Лёд начинает разрушаться в дельтах рек в первой декаде июня. На придельтовых участках губы образуются «языки вытаявания», а севернее в губе сохраняется «ледяная перемычка». Именно такая ситуация показана в атласе на снимке со спутника Тетра, полученном системой MODIS 29 июня 2007 г., на котором в северной части Обской губы видна открытая вода с плавающими льдами, средняя часть Обь-Тазовской губы ещё покрыта льдом, а придельтовые участки и пойма Оби затоплены водами половодья. Полное освобождение губы ото льда наступает лишь в конце июля.

Лена, образующая крупнейшую в России дельту, показана на снимках со спутника Landsat, отражающих её морфологически и генетически сложное строение: систему направленных на восток, северо-восток и запад рукавов, между которыми чётко выделяется включённый в дельту участок морской террасы — о. Арга-Муора-Сисе с обилием мелких термокарстовых озёр.

Ледовые заторы в устьях рек. *Северная Двина*, в устьевой части которой вскрытие ледяного покрова совпадает с резким подъёмом весеннего половодья, характеризуется образованием заторов льда. В атласе приведены снимки, полученные при выполнении Инженерно-технологическим центром СканЭкс проекта «Половодье-2009» по мониторингу весеннего ледохода на крупных реках России в интересах МЧС РФ и Росгидромета [4]. На снимке со спутника Radarsat-1 от 10 мая 2009 г. показан район ледовых заторов в устье Северной Двины, избежать которых, несмотря на проведённые мероприятия в рукавах дельты, не удалось. Заторы после освобождения рукавов ото льда сопровождалась разливами и затоплением прилегающих территорий, которые выделяются на снимке 15 мая 2009 г. Спутниковые данные становятся важным источником информации о ледовой обстановке и площадях затопления для оперативной службы Росгидромета и административных местных органов.

Многолетняя мерзлота. Значительный блок снимков в атласе посвящён многолетней мерзлоте, обуславливающей развитие особых форм поверхности — полигональных структур, рельефно проявляющихся на детальных космических снимках. Снимки отражают различные стадии

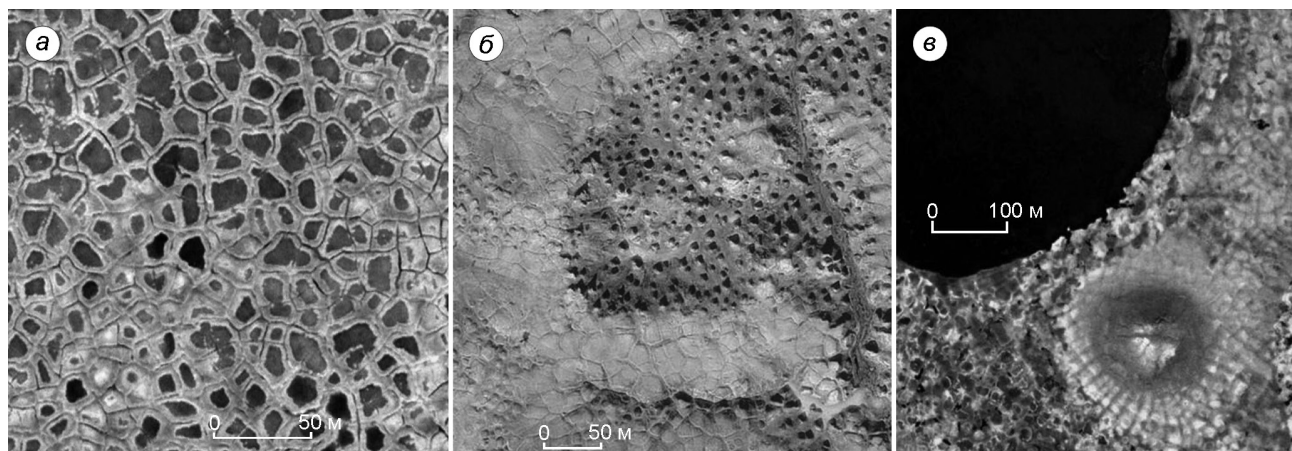


Рис. 3. Формы рельефа криолитозоны:

a – полигонально-валиковый микрорельеф в долине р. Чукочьа (GeoEye, 09.2009 г.); *б* – различные стадии развития полигонального микрорельефа (о. Котельный) (GeoEye, 21.08.2010 г.); *в* – бугор пучения (долина р. Чукочьа) (GeoEye, 09.2009 г.)

Fig. 3. Forms of relief in cryolithozone:

a – low-centre polygons in the Chukoch'ya River valley (GeoEye, 09.2009); *б* – different stages of polygonal microrelief development (Kotelny Island) (GeoEye, 21.08.2010); *в* – pingo (Chukoch'ya River valley) (GeoEye, 09.2009)

развития и виды полигонального микрорельефа – гексагональную, ортогональную сеть, полигонально-валиковый микрорельеф. Показаны также полосчатые структуры: делли и термокарстовые озёра, образующиеся при вытаивании подземных льдов; бугры пучения, формирующиеся при спуске термокарстовых озёр и промерзании подозёрных таликов; наледи, образующиеся при промерзании водоносных подрусловых таликов, и ранее не известные в криолитозоне воронки газового выброса.

Морозобойное растрескивание. Полигональный микрорельеф. На примере снимка полигонального ландшафта в устье р. Яна в атласе показан весь комплекс полигональных структур, с развитием которых связана опасность разрыва подземных коммуникаций, кабелей и разрушения покрытия дорог и аэродромов. Охарактеризуем отдельные виды полигональных структур.

Гексагональная полигональная сеть с пяти-, шестисторонними отдельностями и углами сочленения трещин 120° возникает в однородном грунтовом массиве без ориентирующего влияния первичной свободной поверхности в непрерывных и постоянных условиях холодного климата. Она показана в атласе на примере участка долины р. Хатанга.

Ортогональная полигональная сеть морозобойных трещин разных генераций с прямыми углами их пересечения характерна для условий

последовательного образования трещин и состоит из трещин разных временных генераций, первая из которых параллельна первичной свободной поверхности. Она показана на примере снимка юго-восточной части дельты р. Лена.

Полигонально-валиковый микрорельеф иллюстрируется на примере снимка участка долины р. Чукочьа (рис. 3, *a*). Возникновение в результате морозобойного растрескивания валиковых полигонов предопределяет возможность накопления воды во внутрполигональных ваннах. Подобные ландшафты характерны для аласов северных приморских низменностей, пойм северных рек – Лены, Хатанги, Яны, Индигирки в их нижних течениях.

В атласе отражён ряд стадий развития полигонального микрорельефа, связанных с многолетними изменениями природной обстановки. На начальной стадии вытаивания жильных льдов формируются канавки над жилами льда, возникает выпукло-полигональный микрорельеф, рассмотренный ранее. При дальнейшем развитии процесса образуется остаточный рельеф – байджерахи, представляющие собой бугры высотой до нескольких метров. Они показаны на снимке со спутника GeoEye участка на о. Котельный (см. рис. 3, *б*). Вытаивание полигонально-жильных льдов опасно для устойчивости зданий и сооружений, в том числе линейных объектов – дорог и трубопроводов.

Значительные территории в Арктике представляют собой области с характерным полосчатым рисунком на склонах, где близко к поверхности залегают коренные породы. Так изображаются делли — мелкие ложбины, по которым стекают поверхностные воды. Приведённые в атласе снимки показывают делли на низких водоразделах предгорной равнины кряжа Прончищева на побережье моря Лаптевых.

Термокарстовые озёра, образующиеся при вытаивании подземных льдов, — примечательная черта ландшафтов криолитозоны. Площади, глубина и вид термокарстовых озёр тесно связаны с типом вытаивающих подземных льдов. В атласе представлены снимки различных типов озёр. Районам с преобладанием залежей пластового льда, мощность которых составляет десятки, а протяжённость сотни метров, свойственны наиболее масштабные образования. Это — округлые глубокие озёра диаметром до 10–15 км. Такие озёра, почти полностью занимающие озёрную котловину, характерны для Центрального Ямала и показаны на снимке со спутника Landsat. Районы распространения мощных повторно-жильных льдов, напротив, отличаются развитием обширных осушенных термокарстовых котловин. Озёра в этих котловинах существовали в прошлом, но были спущены или заполнены осадками и в настоящее время занимают только часть площади этих котловин. Они представлены снимком участка Яно-Индибирской низменности.

Процессы многолетнего пучения, развивающиеся в котловинах термокарстовых озёр при их спуске и промерзании подошёрных таликов, хорошо отразились на снимке участка Колымской низменности на правом берегу низовьев р. Алазея, где в средних частях многих термокарстовых озёрных котловин видны светлые округлые пятна участков пучения. Их размеры в пределах снимка составляют от 0,5 до 2–3 км. На изображении различаются бугры, формирующиеся (светлые участки суши в пределах тёмного кольца озера) и разрушающиеся. Большие бугры пучения, широко распространённые в долинах крупных рек и на приморских арктических равнинах, показаны на примере многолетнего бугра пучения в долине р. Чукочьа на рис. 3, в. Размеры бугров могут достигать 30–60 м в высоту при диаметре основания 100–300 м. Поверхность бугров часто разбита системой трещин.

Наледи, формирующиеся за счёт излияния подземных вод на поверхность при перемерзании водоносных путей, распознаются на летних снимках по остаткам ледяных тел, наледным полянам — расширенным участкам днищ долин с многорукавными руслами, а также по избыточному обводнению поверхности. Эти признаки хорошо видны на включённом в атлас снимке со спутника Landsat, охватывающем верховья р. Танюрер, левого притока р. Анадырь на Чукотке. Наледи опасны при автомобильном и железнодорожном строительстве. Важно, что в районах сплошной мерзлоты наледи позволяют оценить ресурсы подземных вод.

Воронки газового выброса представляют собой ранее неизвестное явление в криолитозоне. Впервые оно обследовано летом 2014 г. на севере Западной Сибири, где обнаружено несколько таких воронок. Представленная в атласе на детальном снимке со спутника WorldView-1 воронка расположена в центральной части п-ова Ямал в 40 км южнее Бованенковского газоконденсатного месторождения, в 4 км восточнее проходящего с севера на юг магистрального газопровода «Бованенково–Ухта». Воронка связана с выбросом газа из мёрзлых толщ и образовалась на месте бугра-предшественника, существовавшего в 2013 г. В 2014 г. воронка представляла собой кратер диаметром в верхней части 25–29 м, глубиной более 50 м, окруженный бруствером из выброшенных пород, отдельные фрагменты которых обнаружены на удалении до 120 м. Эти явления опасны для объектов хозяйственной инфраструктуры на арктических равнинах.

Ландшафты, растительность, животный мир. В атласе представлены снимки разных видов тундровых ландшафтов, воспроизводящие визуальные образы арктической тундры, типичной тундры, лесотундры, и приведены результаты обработки разновременных космических снимков, свидетельствующие об изменении фитомассы растительности в период потепления. Показаны также возможности применения космической съёмки для наблюдения за крупными морскими животными.

Арктическая тундра. Суровые ландшафты арктической тундры, формирующиеся на побережье Северного Ледовитого океана и островах северных морей, представлены на снимке восточной части о. Большой Ляховской в Восточно-Сибирском море. Снимок передаёт картину

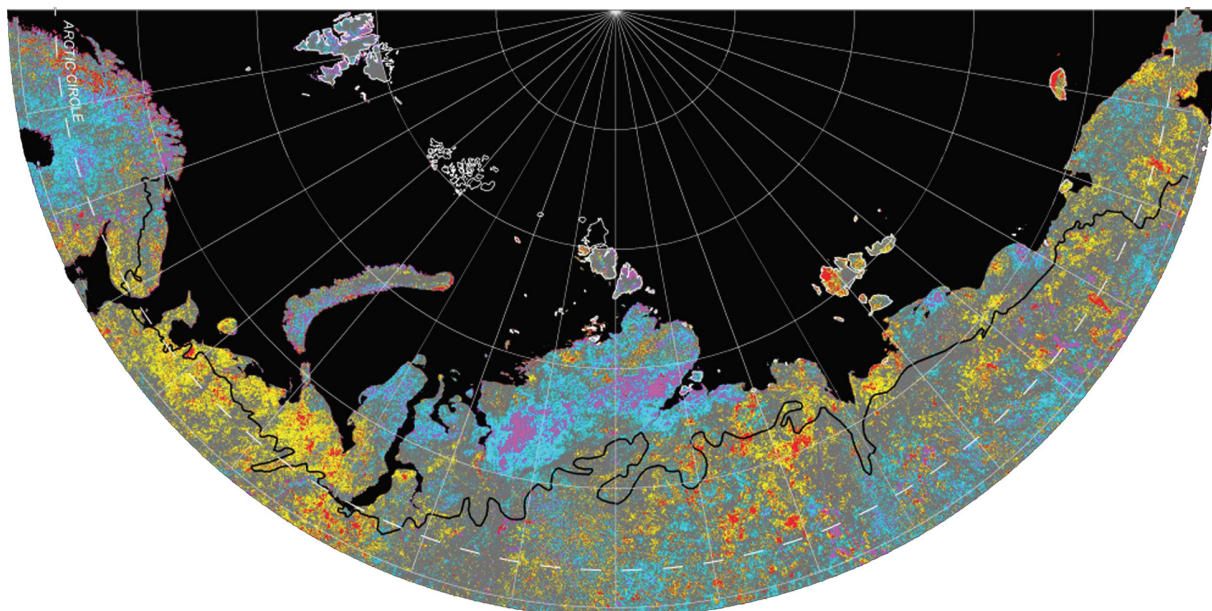


Рис. 4. Изменения вегетационного индекса NDVI за 2000–2009 гг. (пояснения см. в тексте).

Чёрной линией показана северная граница леса

Fig. 4. Changes of vegetation index NDVI for 2000–2009 (notes in the paper).

The black line shows the northern boundary of the forest

обеднённой низкорослой мохово-лишайниковой растительности при полном её отсутствии на вершинных поверхностях, откуда снег сдувается сильными ветрами; характерно сохранение снега в эрозионных ложбинах.

Типичная тундра. Северные тундры со сплошным покровом низкорослой моховой, лишайниковой, кустарничковой растительности представлены на снимке участка Яно-Индибирской низменности со спутника Landsat. Переданы примечательные черты местности – множество термокарстовых озёр, котловин спущенных озёр (аласов), заболоченные долины медленно текущих сильно меандрирующих рек.

Лесотундра отличается вторгающимися в тундру участками лесной растительности – берёзового криволесья, елового или лиственничного редколесья. На представленном в атласе снимке сверхвысокого разрешения участка долины р. Юридейях, полученном со спутника WorldView-2, на светлом фоне лишайникового покрова чётко отобразился разреженный еловый древостой, особенно хорошо заметный за счёт длинных, отбрасываемых при низком Солнце теней от стволов и крон деревьев.

Вегетационный индекс. Зелёная растительность тундры и лесотундры видна на снимках

из космоса благодаря сильному поглощению спектра солнечного излучения в красном и отражению в ближнем инфракрасном диапазоне. Для анализа изменений её состояния широко используется вегетационный индекс NDVI, который рассчитывается как отношение разности сигналов яркости в ближней инфракрасной и красной зонах к их сумме и имеет тесную корреляцию с запасом зелёной фитомассы. По данным съёмки сканирующей системой MODIS спутника Terra за 2000–2009 гг. исследователями Института биологии Коми Научного центра Уральского отделения РАН [5] выявлены тренды изменений зелёной фитомассы растительности Арктики за 10 лет. На представленной на рис. 4 фотокарте увеличение значений фитомассы показано тёплыми (красным и жёлтым), а снижение холодными (голубым и фиолетовым) цветами; участки без изменений отмечены серым цветом. Фотокарта показывает, что период потепления последних десятилетий способствовал росту фитомассы (закустаривание, залужение) на Европейском Севере, в некоторых районах Восточной Сибири (Яно-Индибирская низменность), на островах Котельный и Врангеля, отобразившихся красно-жёлтыми цветами. На Таймыре и Северном Ямале, где на фотокар-

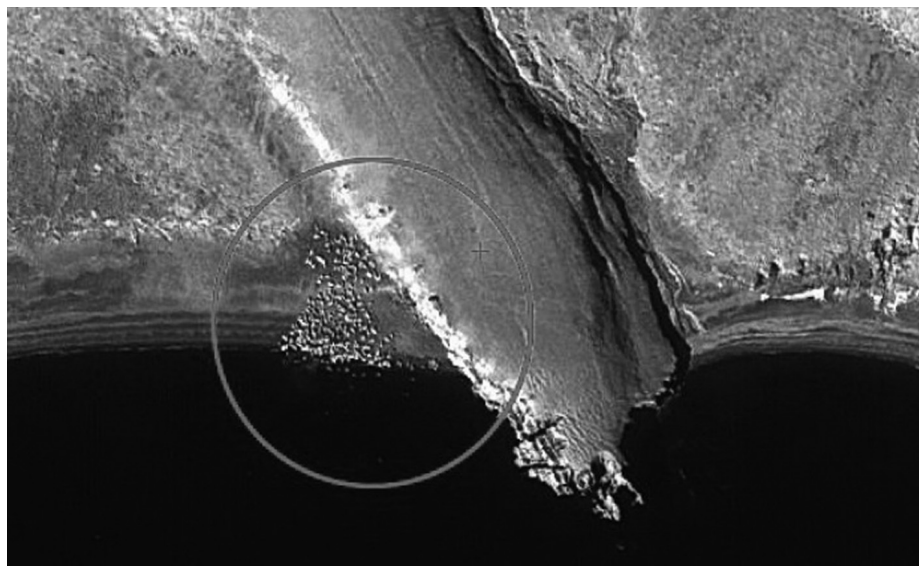


Рис. 5. Лежбище моржей на снимке со спутника EROS-B (28.06.2011 г.)

Fig. 5. Sea dogs lie site at EROS-B image (28.06.2011)

те видны голубые и фиолетовые пятна, значения вегетационного индекса уменьшились.

Моржи и тюлени. В юго-восточной части Баренцева моря обитает малочисленная и, вероятно, в значительной степени изолированная от основной популяции «южная» группировка атлантического подвида моржа (занесён в Красную книгу РФ). Подготовка к эксплуатации разведанных здесь месторождений углеводородного сырья, установка морских добывающих платформ, рост судоходства увеличивают антропогенное воздействие на экосистемы данного района. Полевые исследования по учёту здесь моржей крайне трудоёмки и дорогостоящи. В июне 2011 г. Инженерно-технологический центр СканЭкс при поддержке Всемирного фонда дикой природы России и Совета по морским млекопитающим ВНИИ Природы начали проект по оперативному спутниковому мониторингу арктических млекопитающих (моржей, тюленей, медведей) [7]. Материалы такого мониторинга представлены в атласе для районов лежбищ моржей на о. Матвеев, который входит в состав государственного природного заповедника «Ненецкий». На снимке со спутника EROS-B 28 июня 2011 г. с разрешением 0,7 м, приведённом в атласе, обнаружено скопление около 200 особей моржей (рис. 5). Другое лежбище моржей на о. Вайгач обнаружено на снимке с того же спутника 4 сентября 2011 г.

Ежегодно с февраля по апрель проводится мониторинг мест скопления новорождённых детёнышей (бельков) гренландского тюленя в Белом море [8]. Лунки («продыхи») и идущие к ним следы гренландских тюленей видны на приведённом в атласе снимке со спутника EROS-B за 22 марта 2012 г. Поскольку при бесконтрольном прохождении судов в начале весны через места залежек значительно уменьшается численность популяции (при прокладывании каждого ледового канала гибнут до 500–1000 детёнышей), капитанам судов даются рекомендации по обходу залежек. В связи с успешным проведением пионерных проектов планируется расширение областей мониторинга и проведение съёмки вдоль береговой линии Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского морей, а также моря Лаптевых.

Недропользование. Промышленное воздействие. Воздействие промышленности и добычи полезных ископаемых на легко ранимую природу Севера показано в атласе на примере снимков Хибин и Норильского промышленного района. Представлена также и добыча нефти на шельфе.

Хибины–Мончегорск. Центры горно-добывающей и горно-металлургической промышленности на Кольском полуострове – в Хибинах, Мончегорске, Оленегорске, Печенге, Никеле, Кандалакше – относятся к источникам загрязнения природной среды, в частности, тяжёлыми металлами, которое проявляется на снимках



Рис. 6. Недропользование и промышленное воздействие:

a – загрязнение снежного покрова на Кольском полуострове (IRS P6/LISS 02.05.2006 г.); *б* – Кировский рудник в Хибинах (GeoEye, 22.08.2009 г.); *в* – нефтяная платформа Приразломная на шельфе Печорского моря (EROS-B, 14.02.2012 г.)

Fig. 6. Mine extraction and industrial impact:

a – pollution of snow cover at the Kola Peninsula (IRS P6/LISS 02.05.2006); *б* – Kirovskiy mine in the Hibin mountains (GeoEye, 22.08.2009); *в* – platform of oil extraction Prirazlomnaya at the shelf of the Pechora Sea (EROS-B, 14.02.2012)

через загрязнение снега. На приведённом в атласе зимнем снимке со спутника IRS, охватившем Хибинский горный массив и его окрестности (рис. 6, *a*), чёрным тоном выделяются обширные зоны загрязнения снежного покрова вокруг Мончегорска и Оленегорска.

Воздействие дыма медно-никелевого комбината в Мончегорске привело к тому, что в 1970–90-х годах на месте таёжных лесов на расстоянии 5–8 км от комбината образовались техногенные пустоши. На приведённом в атласе снимке со спутника Landsat они выделяются сплошным красно-коричневым тоном – таким же, как каменистые полярные пустыни на вершинах Хибин. Снимки зафиксировали и зону с мёртвым еловым и сосновым сухостоем на расстоянии 10–18 км от комбината и третью зону на расстоянии 18–25 км от комбината, где северо-таёжные леса трансформированы в угнетённые елово-берёзовые редколесья [9]. Хотя снижение уровня производства на рубеже веков способствовало некоторому восстановлению растительности, дымовые выбросы, например в 2010 г., свидетельствуют, что проблема космического мониторинга остаётся актуальной.

Норильск. На зимнем снимке Норильского горно-промышленного района выделяются мощные дымы промышленных предприятий. Промышленные выбросы Норильского медно-никелевого горно-металлургического комбината

приводят к загрязнению атмосферы вредными химически активными веществами, выпадению кислотных дождей, гибели лесов, начавшейся с конца 1960-х годов. Как свидетельствуют снимки, в последующие годы граница погибших насаждений продвинулась на юго-восток в направлении преобладающих летом ветров на 120 км вплоть до Хантайского водохранилища, а признаки повреждения к 1990-м годам отмечались на расстоянии до 200 км от Норильска.

Кировский рудник. На территории Хибинского горного массива расположено крупнейшее месторождение апатит-нефелиновых руд и работает несколько рудников. На снимке со спутника GeoEye (см. рис. 6, *б*) показан Кировский рудник, который по объёму подземной добычи руды входит в десятку крупнейших рудников Европы. В зоне рудника, имеющей крестообразную форму, в её центре, на снимке хорошо видны полосчатые структуры ступеней карьера, фестончатые отвалы отработанной породы, серпантин дороги, поднимающейся на склон горы Юкспор к штольне, и посёлок горняков.

Платформа Приразломная. В 1989 г. на шельфе Печорского моря в 55 км от берега открыто нефтяное месторождение Приразломное. Бурение скважин, добычу нефти, её хранение и отгрузку обеспечивает морская ледостойкая стационарная платформа, показанная на снимке со спутника EROS-B (см. рис. 6, *в*). В сентябре

2012 г. в связи с действиями активистов Гринпис, опасавшихся нефтяного загрязнения, Газпром отложил старт добычи до принятия законодательных решений. По инициативе WWF разработан и принят в декабре 2012 г. закон, запрещающий добычу углеводородов на шельфе, если компания-оператор не располагает технологией ликвидации разлива нефти подо льдом. В настоящее время на платформе начаты добыча нефти и её отгрузка на танкеры.

Выводы

Космические снимки, включённые в подготавливаемый АО «Роснефть» Атлас «Российская Арктика», усиливают его научную составляющую и экологическую направленность. Впервые в атласе представлена тематическая подборка космических снимков, освещающая особенности

геосистем криолитозоны, их реакцию на потепление климата и губительное воздействие на легкоуязвимые экосистемы Севера при освоении территории. Снимки расширяют круг читателей атласа, привлекают внимание учёных, организаторов производства, управленцев, специалистов по охране природы, жителей Севера. Широкое и многоплановое космическое оснащение нового атласа, несомненно, обеспечит лучшее понимание экологических проблем и поможет разработке мероприятий по их решению, будет способствовать рациональному природопользованию.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект 18-05-60221. Авторы благодарят также ИТЦ СканЭкс за предоставление уникальных космических снимков.

Acknowledgements. This work was supported by RFFI, project 18-05-60221. Authors thanks also ITC ScanEx for unique satellite images.

Литература

1. Атлас Арктики. М.: ГУГК, 1985. 204 с.
2. Российская Арктика в XXI веке: природные условия и риски освоения. М.: Феория, 2013. 144 с.
3. Национальный Атлас Арктики. М.: Роскартография, 2017. 496 с.
4. *Евтушенко Н.В., Филимонова Н.А., Скрипник Е.Н.* Половодье на реках России: мониторинг из космоса // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. 2009. Вып. 2. С. 34–38.
5. *Елсаков В.В.* Изменения растительного покрова севера Евразии в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий. Анализ съёмки MODIS 2000–2016 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 56–72.
6. Приливные электростанции / Под ред. Л.Б. Бернштейна. М.: Энергоатомиздат, 1987. 296 с.
7. *Семенова В.С., Книжников А.Ю., Болтунов А.Н., Евтушенко Н.В.* Изучение популяции атлантического моржа в Баренцевом море с помощью космических технологий // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. 2011. Вып. 10. С. 89–90.
8. *Черемисова А.М., Пупышева Н.В.* Практика применения технологий спутникового мониторинга в России // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. 2012. Вып. 13. С. 31–37.
9. Экология Севера: дистанционные методы изучения нарушенных экосистем (на примере Кольского полуострова). М.: Научный мир, 2003. 248 с.

References

1. *Atlas Arktiki.* Atlas of Arctic. Moscow: GUGK, 1985: 204 p. [In Russian].
2. *Rossiyskaya Arktika v XXI veke: prirodnye usloviya i riski osvoeniya.* Russian Arctic in XXI century: nature conditions and risks of economy development. Moscow: Feoriya, 2013: 144 p. [In Russian].
3. *Natsional'nyi Atlas Arktiki.* National Atlas of Arctic. Moscow: Roskartografiya, 2017: 496 p. [In Russian].
4. *Evtushenko N.V., Filimonova N.A., Skripnik E.N.* Spring flood at rivers of Russia: monitoring from space. *Zemlya iz kosmosa – naibolee effektivnye resheniya.* Earth from space – the most effective solutions. 2009, 2: 34–38.
5. *Elsakov V.V.* Changes of vegetation cover of the Northern Eurasia under conditions of climatic fluctuations in last decades. Analyzing of MODIS survey pn 2000–2016. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2017, 14 (6): 56–72. [In Russian].
6. *Prilivnye elektrostantsii.* Tidal power plants. Ed. L.B. Bernshtein. Moscow: Energoatomizdat, 1987: 296 p. [In Russian].
7. *Semenova V.S., Knizhnikov A.Yu., Boltunov A.N., Evtushenko N.V.* Investigation of Atlantic sea dogs population in the Barents Sea using satellites technologies. *Zemlya iz kosmosa – naibolee effektivnye resheniya.* Earth from space – the most effective solutions. 2011, 10: 89–90. [In Russian].
8. *Cheremisova A.M., Pupyшева N.V.* Practices of using of satellite monitoring technologies in Russia. *Zemlya iz kosmosa – naibolee effektivnye resheniya.* Earth from space – the most effective solutions. 2012, 13: 31–37. [In Russian].
9. *Ekologiya Severa: distantsionnye metody izucheniya narushennykh ekosistem (na primere Kol'skogo poluostrova).* Ecology of the North: remote sensing of ecosystem disturbance (key study of Kola Peninsula). Moscow: Nauchnyi mir, 2003: 248 p. [In Russian].