ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

GEOINFORMATION TECHNOLOGIES AND REMOTE METHODS OF EARTH RESEARCH

УДК: 528.7: 913.9(98) **DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-261-274**

В.И. Кравцова[1], Е.И. Пижанкова[2], А.И. Кизяков[3], А.В. Гаврилов[4]

ВИЗУАЛЬНЫЕ ОБРАЗЫ ЭКОСИСТЕМ АРКТИКИ НА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена функция визуализации информации как общее свойство космических снимков. Воспроизводя визуальные образы местности, космические снимки не только показывают состояние экосистем в момент съёмки, но и отражают их изменения во времени. Это особенно важно при исследовании арктических территорий, экосистемы которых сейчас находятся в состоянии динамического неравновесия, что связано, с одной стороны, с потеплением климата, а с другой – с энергичным освоением северных районов и неизбежным при этом антропогенным воздействием. Приводимые в докладе космические снимки отражают оба эти вида изменений природной среды. Уменьшение площади морских льдов проиллюстрировано материалами съёмки из космоса северной полярной шапки на период наибольшего сокращения площади. Разновременными снимками зафиксировано отступание берегов, сложенных подземными льдами, в результате развития процессов термоабразии, теромоэрозии и термоденудации. Большое внимание в докладе

[1] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д.1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: **valentinamsu@yandex.ru**
[2] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Геологический факультет, Ленинские горы, д.1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: **pijankova@yandex.ru**
[3] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д.1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: **akizyakov@mail.ru**
[4] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Геологический факультет, Ленинские горы, д.1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: **gavrilov@bk.ru**

уделено формам мерзлотного рельефа, хорошо отображаемым на снимках высокого разрешения – показан полигональный микрорельеф разного типа и стадий развития, бугры пучения, делли, термоэрозионные формы. Охарактеризовано образование наледей, термокарстовых озёр, воронок газового выброса. Воздействие недропользования на ранимую природу Арктики показано на примере рудников в Хибинах и платформы нефтедобычи на шельфе Баренцева моря. Даны яркие примеры деградации растительности в районах Норильска и Мончегорска, где под сернокислыми дымами медно-никелевых комбинатов образовались техногенные пустоши. Приведенные материалы показывают острую необходимость использования космических снимков для разработки мер охраны и защиты арктических экосистем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: космические снимки, морской лёд, берега, многолетняя мерзлота, промышленное воздействие

Valentina I. Kravtsova[1], Elena I. Pizhankova[2], Alexander I. Kizyakov[3], Anatoly V. Gavrilov[4]

VISUAL IMAGES OF ARCTIC ECOSYSTEMS AT SATELLITE PICTURES

ABSTRACT

The function for visualization of information is observed as common property of satellite pictures. Due to reproduction of visual images of territory, satellite pictures reflect not only ecosystems stage at moment of survey, but also their changes in time. That is especially important for investigation of Arctic regions, which ecosystems are filling state of dynamic unequilibrum, caused, from one site, by climate worming, and from the other site, with intensive familiarization of the Northern regions and inevitable anthropogenic impact. Satellite pictures, included into the paper, are reflect the both kinds of changes. Sea ice area reducing in warming conditions is illustrated by materials of satellite survey of the Northern ice cap for years of the most area decreasing. Multitemporal images had fixed retreat of shores with underground ice, as result of thermoabrasion, thermal erosion and thermal denudation processes development. Special attention is given to forms of permafrost relief, which reflects at images of very high resolution: polygonal relief of various kinds and stages of development, pingos, dally, thermal erosion forms. Forming of river ice fields, thermokarst lakes, gas emission craters out are characterized. Impact of entrails of the earth exploration to woundable arctic nature is shown at examples of mines in the Khibin mountains and oil platform at shelf of the Barents Sea. Strong examples of vegetation degradation are given for regions of Norilsk and Monchegorsk towns, where technogenic wastes were formed under cupper-nickel fabrics sulfur smokes. These materials show strong necessity of using satellite images for investigation of adaptive solutions for arctic ecosystems conservation and defense.

KEYWORDS: satellite pictures, sea ice, shores, permafrost, industrial impact

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* **valentinamsu@yandex.ru**
[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* **pijankova@yandex.ru**
[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* **akizyakov@mail.ru**
[4] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* **gavrilov@bk.ru**

ВВЕДЕНИЕ

Космические снимки, воспроизводя внешний облик земной поверхности, передают многоплановую информацию о местности. Снимки обладают замечательным свойством, выполняя важную для любых изображений функцию – визуализации информации. Восприятие мира для большинства людей связано прежде всего со зрительным восприятием. Считается, что человек получает почти 90 % информации об окружающем мире посредством зрения. Мы часто говорим: «Лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать». В своей итоговой книге о теоретико-методологических основах аэрокосмического стереомоделирования Ю.Ф. Книжников [2015] оценивает зрительную систему человека как биологическую информационную систему, предназначенную для создания модели видимого мира – визуального зрительного образа. Именно такой визуальный зрительный образ создаёт в нашем сознании космический снимок, и этот образ в ряде случаев оказывается воспринимаемым значительно легче, чем словесное описание или карта со сложной текстовой легендой.

Космические снимки, воспроизводя визуальные образы местности, не только показывают состояние экосистем в момент съёмки, но и отражают их изменение во времени. Это достигается как прямым путём, при получении серии разновременных снимков и их сравнении, так и косвенным, поскольку снимки фиксируют определённый момент в ряду известных изменяющихся состояний либо отражают индикаторы изменений. Эти общие положения дистанционного зондирования особенно важны при исследовании арктических территорий, экосистемы которых сейчас находятся в состоянии динамического неравновесия, связанного, с одной стороны, с наблюдающимся с середины прошлого века потеплением климата, а с другой стороны – с открытием на Севере новых источников энергетического сырья и энергичным освоением северных районов. Оба направления изменений чрезвычайно важны для экологической оценки территории. Экологическая ценность космической информации для выявления источников загрязнения в разных природных средах, распространения загрязнений и их губительного воздействия на экосистемы ярко проиллюстрирована в изданном недавно новом Экологическом атласе России [Экологический…, 2017]. В настоящей работе это направление использования космических снимков как визуальных источников экологически важной информации конкретизировано по отношению к экосистемам Арктики. Космические снимки рассматриваются в ней как источники информации об изменении экосистем в двух названных выше направлениях – о естественных изменениях в связи с потеплением климата и антропогенных изменениях в связи с промышленным освоением Севера. Естественные изменения в связи с климатическими колебаниями рассмотрены на примере морских льдов, берегов северных морей, мерзлотного рельефа криолитозоны, а антропогенные изменения экосистем − на примерах недропользования, промышленного загрязнения и связанной с ним деградации экосистем, а также на отдельных позитивных примерах предотвращения загрязнений, борьбы с их распространением. Приведённые примеры включены в подготавливаемый издательством «Феория» при поддержке газово-нефтяного комплекса новый атлас «Российская Арктика».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В докладе рассмотрены материалы космической съёмки разных типов. Явления глобального масштаба иллюстрируются на обзорных снимках сверхмалого разрешения, сочленённых в покрытие для северного полушария; при этом, учитывая необходимость всепогодных наблюдений независимо от условий облачности, используются снимки в радиодиапазоне – микроволновые радиометрические снимки со спутников Nimbus, DMSP, представляющие собой главное средство мониторинга сокращения полярной шапки морских льдов. Однако большая часть приведённых материалов – снимки в видимом диапазоне спектра. Региональные объекты – участки морей, острова, типы тундр

криолитозоны, воздействие на природную среду в крупных промышленных районах – показаны на снимках относительно высокого разрешения со спутников Landsat, SPOT, с разрешением в первые десятки метров. Для расширения периода ретроспективного анализа привлекаются аэрофотоснимки, полученные до начала космических съёмок. Детали земной поверхности, формы мерзлотного микрорельефа, их развитие и деградация при потеплении отображаются на детальных снимках сверхвысокого, метрового, разрешения со спутников Ikonos, QuickBird, GeoEye, в том числе включённых в информационную систему GoogleEarth. Таких снимков в докладе большинство. Комментарии к снимкам основаны на опыте многолетних полевых наблюдений авторов в арктических районах, экспедиционных наземных, судовых, аэровизуальных исследованиях [Экология …, 2003].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

МОРСКИЕ ЛЬДЫ И БЕРЕГА СЕВЕРНЫХ МОРЕЙ

Сокращение полярной шапки льдов

Общеизвестно, что потепление климата в последние десятилетия привело к активному таянию морских льдов Северного ледовитого океана, что существенно изменило условия судоходства по северному морскому пути. 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 различной сплочённости. Охваченная единым взглядом шапка морских льдов в момент их наибольшего летнего таяния в августе–сентябре (рис. 1) ярко иллюстрирует сокращение их площади с 1979 по 2007 годы. Такие масштабные изменения влияют на климатические процессы, циркуляцию атмосферы. Но, конечно, главным следствием сокращения площади морских льдов оказалось улучшение условий судоходства в северных морях. Это важнейшее для северных районов экономическое следствие потепления сочетается с рядом последствий деструктивного характера, связанных с влиянием потепления на состояние многолетнемёрзлых пород, слагающих берега северных морей.

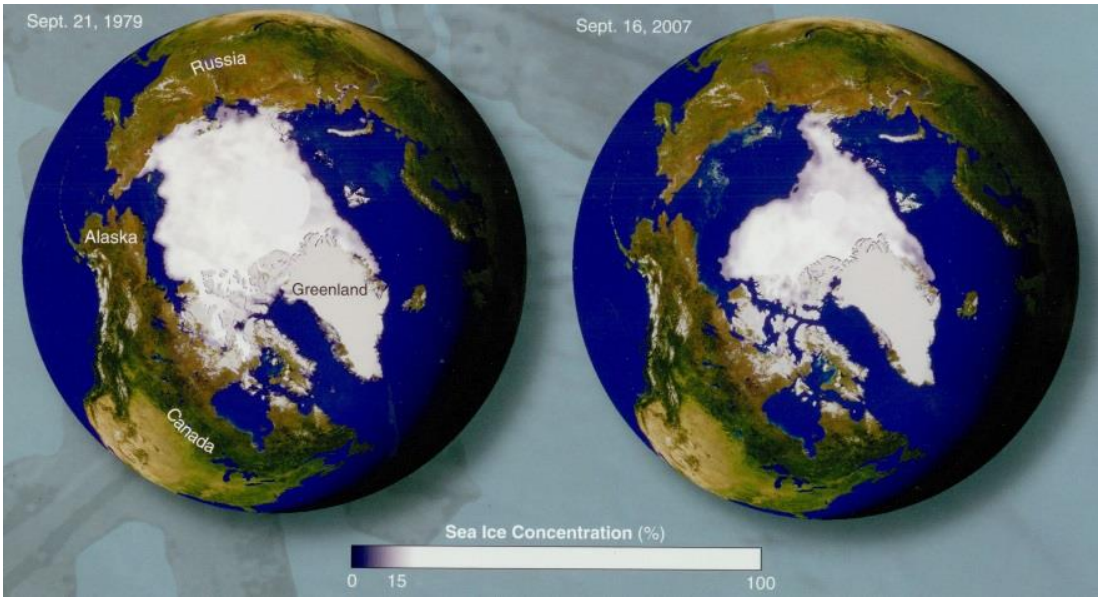
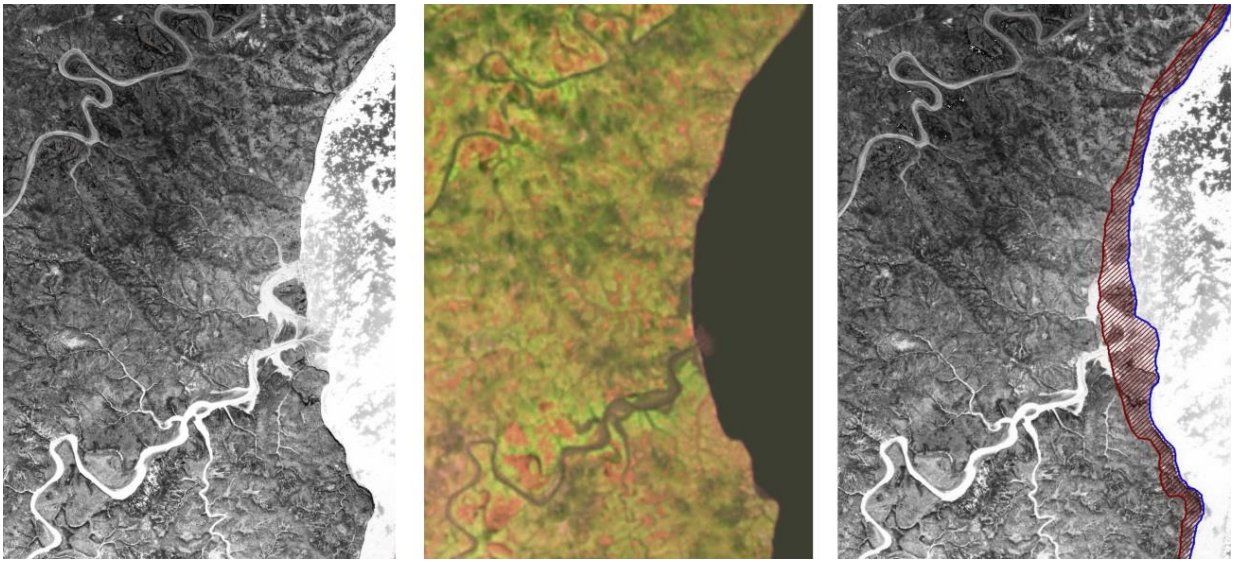


Рис. 1. Распространение морских льдов при концентрации более 30 %
в 2010 году по данным спутника DMSP
Fig. 1. Coverage of sea ice with concentration 30 %
in 2010 by DMSP data

Разрушение и отступание берегов

Потепление во второй половине XX века приводит к разрушению и отступанию морских берегов, сложенных подземными льдами, чему способствуют усиление волнового воздействия и активизация процессов термоабразии, термоэрозии и термоденудации. Это особенно заметно на берегах островов северных морей и может быть показано на примере берега о. Новая Сибирь в Восточно-Сибирском море (рис. 2). Отличительной особенностью Новосибирских островов является высокое содержание в горных породах подземных льдов различного происхождения. При сравнении результатов дешифрирования аэрофотоснимков 1952 года и снимков со спутника Landsat 2001 года на участке восточного побережья острова Новая Сибирь вблизи устья реки Грязной величина отступания за 50-летний интервал времени достигла 540 м, а скорость – 10,8 м/год. Такие примеры не единичны. Несмотря на малый период открытой воды, когда активизируются процессы разрушения подземных льдов, отступание льдистых берегов достигает значительных величин, скорость отступания составляет 5–10 м/год. За последние полтора десятилетия скорость отступания льдистых берегов возросла более чем в 2 раза.



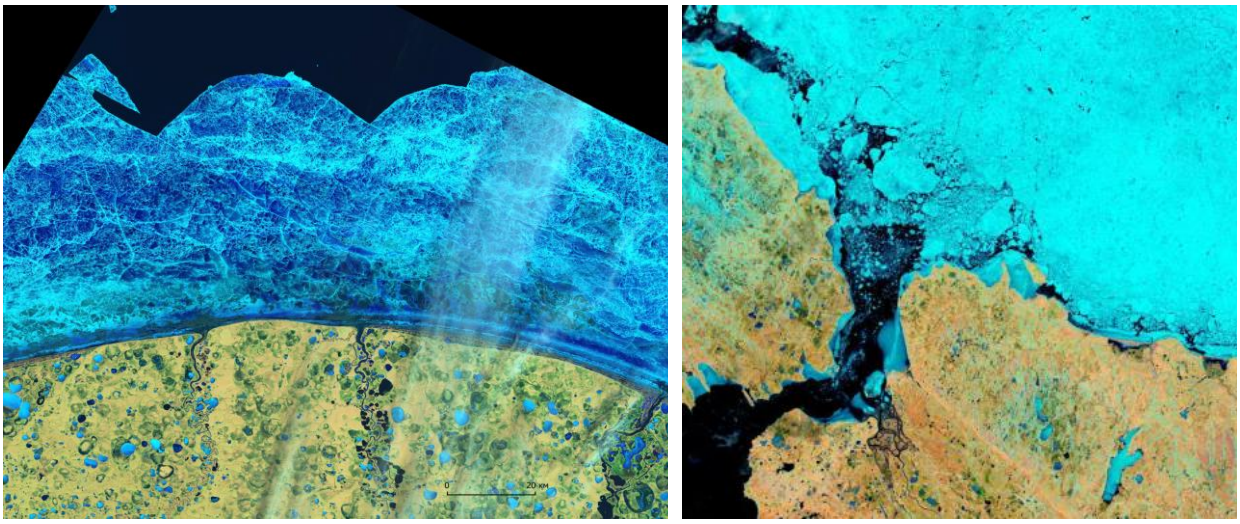
а б в
a b c

Рис. 2. Отступание берега острова Новая Сибирь:
а – аэрофотоснимок 1952 года; б – снимок со спутника Landsat 2001 года;
в – отступание берега
Fig. 2. Shore retreat at the New Siberia island:
a – air photo picture 1952; b – Landsat picture 2001; c – shore retreat

Защитная роль прибрежных льдов

Интересно, что при развитии процессов отступания северных берегов, морские льды прибрежных районов могут играть и защитную роль. Так, в восточном секторе Российской Арктики берега до 9–10 месяцев в году блокируются припаем. И хотя берега, сложенные многолетнемёрзлыми породами или льдом, разрушаются в результате термоабразии, припай за счёт исключения большую часть года волнового воздействия играет в основном защитную роль в развитии морских берегов; их разрушение происходит только в течение короткого лета и осени. Такая защитная роль припая отражена на июньском снимке со спутника Landsat (рис. 3 а), на котором голубая полоса припая шириной 50 км в Восточно-Сибирском море отделяет от берега открытую воду, изобразившуюся чёрным цветом.

Защитную роль может играть и 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. На рис. 3 б представлен снимок побережья Югорского полуострова, на котором видна узкая полоса припайного льда и скопление дрейфующего льда, закрывающее большую часть акватории южной части Карского моря. Наблюдаемая ситуация определяет стабильность побережья до момента разрушения припая и освобождения акватории от дрейфующего льда.



а б
a b

Рис. 3. Льды у морских берегов: а – припай; б – дрейфующие льды у берега
Fig. 3. Ice near sea shores: a – fast ice; b – drift ice near shore

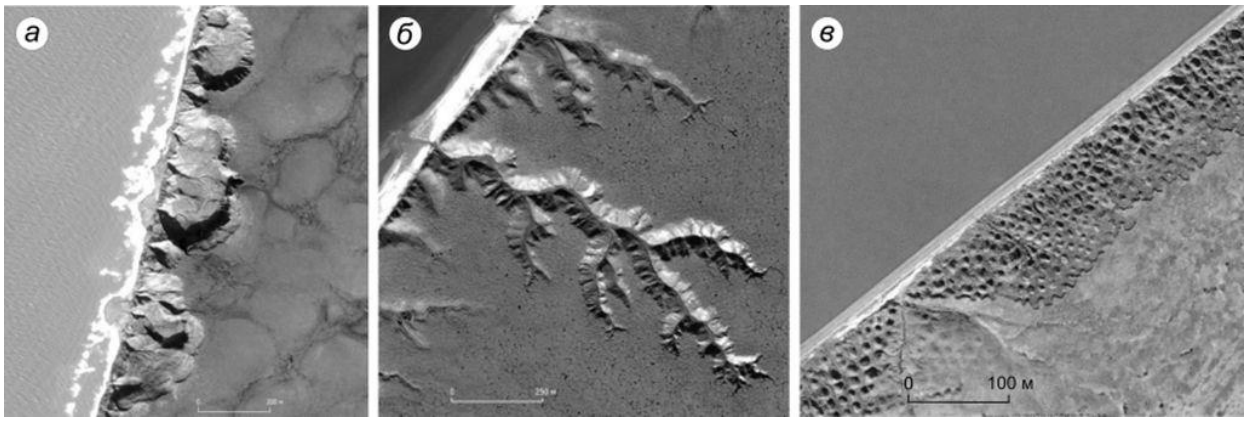
Рельеф берегов, сложенных многолетнемёрзлыми породами

Береговые термоцирки. На берегах, сложенных многолетнемёрзлыми породами, при вытаивании подземных пластовых залежей 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 разрушению берегов. На рис.4 а приведён снимок со спутника GeoEye с береговыми термоцирками на западном побережье острова Колгуев. Термоцирки, характеризующиеся высокой скоростью роста (до 15 м/год), представляют собой реальную опасность для хозяйственных объектов, дорог 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) (рис. 4 б). Начальные эрозионные формы развиваются по сетке повторно-жильных льдов, в результате формируется угловатый ортогональный рисунок овражной сети. Широкое распространение этого процесса осложняет хозяйственное освоение северных территорий.

Байджерахи. На разрушающемся берегу, сложенном отложениями, содержащими мощные повторно-жильные льды, образуются бугры – байджерахи. Они представляют собой нетронутые протаиванием останцы грунтовых блоков, разделённых ледяными жилами, которые вытаивают под воздействием моря и летних температур воздуха. Такие

процессы проявлены на берегу полуострова Быковский, расположенного к юго-востоку от дельты реки Лены, и показаны на примере снимка со спутника SPOT (рис. 4 в).



a b c

Рис. 4. Разрушение берегов, сложенных многолетнемёрзлыми породами:
а – термоцирки; б – термоэрозионные формы; в − байджерахи
Fig. 4. Destruction of shores with permafrost rocks:
a – thermal cirques; b – thermal erosion forms; c – baidzherakhs

МНОГОЛЕТНЯЯ МЕРЗЛОТА

Морозобойное растрескивание. Полигональный микрорельеф. Полигональные структуры, прекрасно проявляющиеся на детальных космических снимках, образуют самый узнаваемый рисунок на арктических равнинах. Формируются они в результате морозобойного растрескивания – одного из наиболее широко распространённых процессов как в области развития многолетнемёрзлых пород, так и в области сезонного промерзания. Из-за температурного сжатия пород при отрицательных температурах происходит образование трещин. В результате заполнения трещин водой или грунтом образуются ледяные или грунтовые жилы. Морозобойное растрескивание приводит к изменениям в микрорельефе и перераспределению растительности, что в свою очередь обусловливает облик ландшафтов криолитозоны. С развитием этого процесса связана опасность разрыва подземных коммуникаций и кабелей, разрушения покрытия дорог и аэродромов. На примере снимка полигонального ландшафта в устье реки Яны в атласе показан весь набор полигональных структур, а далее детально характеризуются их отдельные виды.

Гексагональная полигональная сеть с пяти- и шестисторонними отдельностями возникает в однородном грунтовом массиве без ориентирующего влияния первичной свободной поверхности в условиях непрерывных и постоянных условий холодного климата. Она показана на примере участка долины реки Хатанги (рис. 5 а).

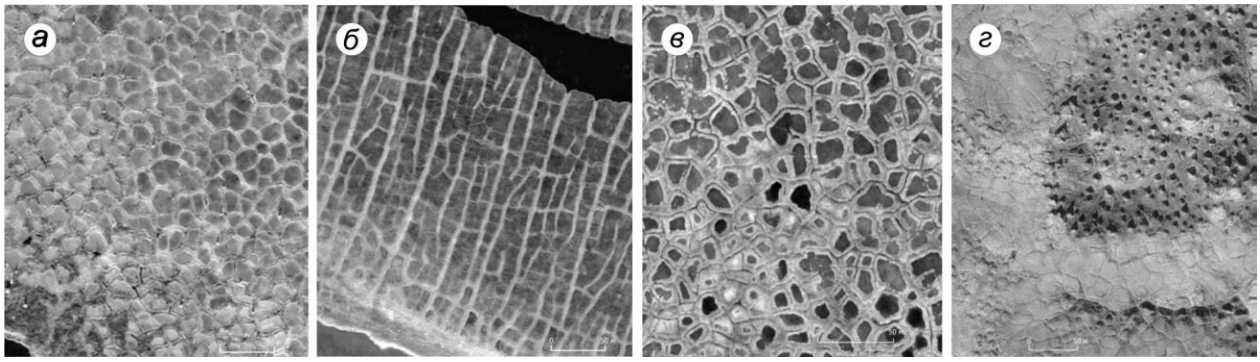
Ортогональная полигональная сеть морозобойных трещин различных генераций показана на примере снимка юго-восточной части дельты реки Лены (рис. 5 б). Ортогональная сеть характерна для условий последовательного образования трещин; она состоит из трещин различных временных генераций, первая из которых параллельна первичной свободной поверхности.

Поскольку характеристики пород и растительность по площади различаются, формируются и системы трещин, отличающиеся от ортогональных и гексагональных, – случайно ориентированные.

Полигонально-валиковый микрорельеф иллюстрируется на примере снимка участка долины реки Чукочья (рис. 5 в). Морозобойное растрескивание приводит к возникновению полигональных форм рельефа и определяет многообразие криогенных ландшафтов (полигональных тундр, бугристо-западинного микрорельефа и других), доминирующих во

многих регионах севера Евразии и Северной Америки. Для полигональных форм характерно циклическое возникновение и исчезновение полигонально-валикового микрорельефа. Возникновение валиковых полигонов свидетельствует о росте повторно-жильных льдов и предопределяет возможность накопления воды во внутриполигональных ваннах. Подобные ландшафты характерны для аласов северных приморских низменностей, пойм северных рек – Лены, Хатанги, Яны, Индигирки и других рек в их нижних течениях.

Различные стадии развития форм полигонального микрорельефа. Байджерахи. В развитии полигонального микрорельефа, обусловленного морозобойным растрескиванием, выделяется ряд стадий, связанных с многолетними изменениями природной обстановки. На начальной стадии вытаивания жильных льдов формируются канавки над жилами льда, возникает выпукло-полигональный микрорельеф. При вытаивании мощных полигонально-жильных льдов происходит значительная просадка вокруг центральных частей полигонов, которые в конечном случае образуют остаточный рельеф – байджерахи – бугры высотой до нескольких метров. Они показаны на снимке со спутника *GeoEye* участка на острове Котельный (рис. 5 г). Вытаивание полигонально-жильных льдов представляет опасность для устойчивости зданий и сооружений, в том числе линейных объектов – дорог и трубопроводов.



a *b* *c* *d*

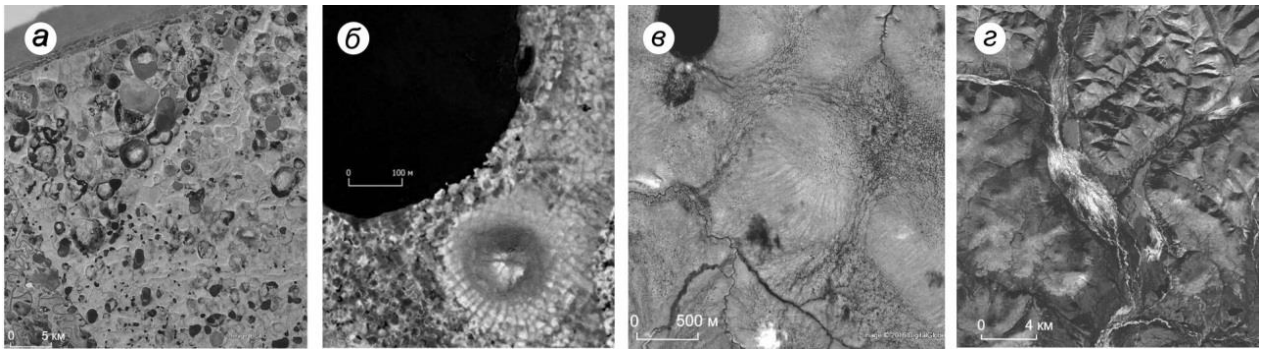
Рис. 5. Формы рельефа криолитозоны.
Полигональный микрорельеф в разных стадиях развития (а–г – пояснения в тексте)
Fig. 5. Forms of relief in criolitozone.
Polygonal micro relief with various stages of development (a–d – notes in the paper)

Бугры пучения. При спуске термокарстовых озёр талики в их котловинах промерзают и развивается многолетнее пучение. Эти процессы хорошо отразились на снимке участка Колымской низменности на правобережье низовьев реки Алазеи (рис. 6 а), 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. Различаются бугры формирующиеся (светлые участки суши в пределах тёмного кольца озера) и разрушающиеся. На разрушающихся буграх видны одно или несколько озерков. Признаками последующих стадий разрушения служат водотоки, дренирующие эти озерки или прорезающие бывший бугор.

При промерзании водонасыщенных таликов в днищах спущенных озёр создаются условия для инъекций воды и образования крупных бугров пучения – булгунняхов (якутское название) или пинго (североамериканское название). На рис. 6 б показан многолетний бугор пучения в долине реки Чукочьей. Такие бугры пучения широко распространены в долинах крупных рек и на приморских арктических равнинах. Размеры бугров могут достигать 30–60 м в высоту при диаметре основания 100–300 м. Поверхность бугров часто разбита системой трещин.

Делли. Значительные территории в Арктике представляют собой области с близким к поверхности залеганием коренных пород и характерным полосчатым рисунком на склонах. Так изображаются делли − мелкие ложбины, по которым осуществляется сток поверхностных вод (рис. 6 в). Приведённый снимок показывает роль полигонального микрорельефа на низких водоразделах предгорной равнины кряжа Прончищева на побережье моря Лаптевых в формировании деллей.

Наледи – ледяные тела, формирующиеся в криолитозоне вследствие излияния подземных вод при перемерзании зимой водоносных путей. Они образуются в тектонически активных горных областях. Летом большая часть наледей стаивает. На летних снимках они распознаются по остаткам ледяных тел, наледным полянам – расширенным участкам днищ долин с многорукавными руслами, избыточному обводнению поверхности. Эти признаки хорошо видны на снимке со спутника Landsat, охватывающем верховья реки Танюрер, левого притока реки Анадыря на Чукотке (рис. 6 г). Наледи опасны при автомобильном и железнодорожном строительстве, однако при прокладке ЛЭП и использовании современных технологий обход наледных полян не является обязательным. Важно, что в районах сплошной мерзлоты наледи дают возможность оценить ресурсы подземных вод.



a b c d

Рис. 6. Формы рельефа криолитозоны:
а, б – бугры пучения; в – делли; г – наледи
Fig. 6. Forms of relief in criolitozone:
a, b – pingos; c – delly; d – frazils

Термокарстовые озёра представляют примечательную черту ландшафтов криолитозоны. Термокарст – процесс вытаивания подземных льдов, сопровождающийся просадкой поверхности и образованием озёрных котловин. Термокарстовые озёра различаются в зависимости от того, по подземным льдам какого типа они формируются. В докладе представлены снимки трёх типов озёр. Районам с преобладанием *залежей пластового льда*, мощность которых составляет десятки, а протяженность сотни метров, свойственны округлые глубокие озёра диаметром до 10–15 км (рис. 7 а). Такие озёра занимают озёрную котловину полностью или почти полностью. Они особенно характерны для центрального Ямала и показаны на снимке со спутника Landsat. Районы распространения *мощных повторно-жильных льдов,* напротив, отличаются развитием обширных осушенных термокарстовых котловин (рис. 7 б). Озёра в этих котловинах существовали в прошлом, но были спущены. Такие котловины выделяются жёлтым фоном. В настоящее время сами озёра занимают только часть площади этих котловин. Они показаны на снимке участка Яно-Индигирской низменности. В области *погребённых остатков ледникового льда*, сложенной песками, к каким относится абразионная морская терраса в западной части дельты реки Лены, называемая «остров Арга-Муора-Сисе», развита масса относительно крупных и мелких озёр, первоначально возникших в

котловинах выдувания (рис. 7 в). Оттаивание пород под озёрами постепенно достигло погребённых льдов, сформировав глубокие ванны в центре озёр. Их светлые внешние мелководные части очерчивают контуры котловин выдувания. Вытянутость цепочек озёр в северо-северо-восточном направлении связана с направлением преобладающих летних ветров.

а б в
a b c

Рис. 7. Термокарстовые озёра (а–в – пояснения в тексте)
Fig. 7. Thermokarst lakes (a–c – notes in the paper)

Воронки газового выброса представляют собой ранее неизвестное явление в криолитозоне, впервые обследованное летом 2014 года на севере Западной Сибири, где обнаружено несколько таких воронок. Представленная в докладе на детальных снимках со спутника *WorldView-1* воронка расположена в центральной части полуострова Ямал в 40 км южнее Бованенковского ГКМ, 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, существовавшего в 2013 году. В 2014 году 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 представляют серьёзную опасность для объектов хозяйственной инфраструктуры на арктических равнинах.

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ПРОМЫШЛЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Хибины. Кольский полуостров – один из самых освоенных районов российского Заполярья, интенсивное промышленное развитие которого началось в 1930-е годы вслед за открытием ряда месторождений полезных ископаемых. На территории Хибинского горного массива расположено крупнейшее месторождение апатит-нефелиновых руд и работает несколько рудников. На Кировском руднике, показанном на снимке со спутника GeoEye, (рис. 8 а) разрабатываются месторождения Кукисвумчорр и Юкспор. По объёму подземной добычи руды он занимает лидирующее положение в России и входит в десятку крупнейших рудников Европы. История его освоения начинается с 1920 года, когда поисково-разведывательная экспедиция академика А.Е. Ферсмана открыла здесь апатит-нефелиновые руды в достаточном количестве для промышленного освоения. Добыча ведётся как подземным, так и открытым способом. В зоне рудника, имеющей крестообразную форму, в её центре на снимке хорошо видны полосчатые структуры ступеней карьера, фестончатые отвалы отработанной породы в долинах, примыкающих к карьеру с северо-запада и северо-востока; на юго-востоке – серпантин дороги, поднимающейся на склон горы Юкспор к штольне, пересекающей эту гору.

К карьерам добычи полезных ископаемых с открытием нефтяных месторождений добавились поля скважин нефтедобычи, составляющие теперь характерную черту антропогенных ландшафтов северных районов континента и выходящие на шельф.

а

a

б

b

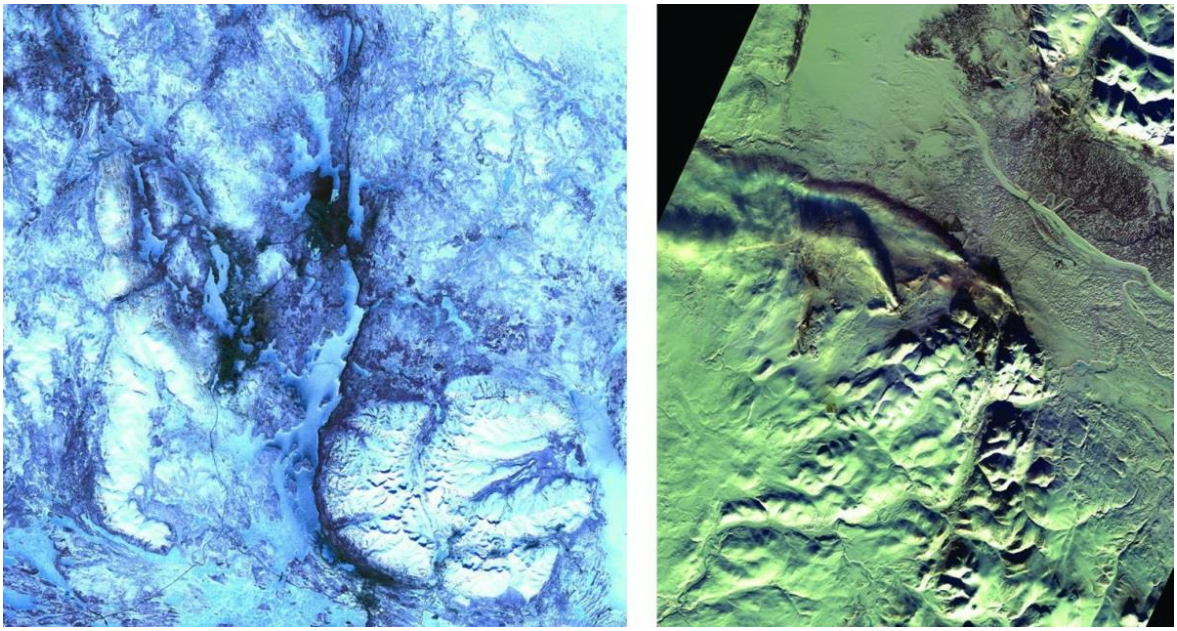
Рис. 8. Добыча полезных ископаемых:
а – Кировский рудник в Хибинских горах;
б – платформа нефтедобычи Приразломная на шельфе
Fig. 8. Mining:
a – mine Kirovsky in Khibin Mountains;
b – oil production platform Prirazlomnaya on the shelf

Платформа Приразломная. В 1989 года на шельфе Баренцева моря в 60 км от берега открыто Приразломное нефтяное месторождение. Бурение скважин, добычу нефти, её хранение и отгрузку обеспечивает морская стационарная платформа, показанная на снимке со спутника EROS B (рис. 8 б). Платформу транспортировали к месторождению от Мурманского причала в августе 2011 года. Однако в сентябре 2012 года 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 года закон, запрещающий добычу углеводородов на шельфе, если компания-оператор не располагает технологией ликвидации разлива нефти подо льдом. В настоящее время на платформе начата добыча нефти и её отгрузка на танкеры.

Промышленное воздействие на северные экосистемы давно и основательно исследуется по космическим снимкам. Особенно значительны работы по изучению воздействия на растительность дымов медно-никелевых комбинатов в Мончегорске и Норильске, повлекшего гибель лесов на значительном расстоянии от источников загрязнения.

Мончегорск. На Кольском полуострове центры горнодобывающей и горнометаллургической промышленности в Хибинах, Мончегорске, Оленегорске, Печенге, Никеле, Кандалакше являются источниками загрязнения природной среды, в частности тяжёлыми металлами. На приведённом зимнем снимке со спутника IRS, охватившем Хибинский горный массив и его окрестности (рис. 9 а), чёрным тоном выделяются обширные зоны загрязнения снежного покрова вокруг Мончегорска и Оленегорска.

Губительное воздействие дымов медно-никелевого комбината в Мончегорске привело к тому, что в 1979–1990-х годах на месте таёжных лесов на расстоянии 5–8 км от комбината образовались техногенные пустоши. На снимках со спутника Landsat они выделяются сплошным красно-коричневым тоном – таким же, как каменистые полярные пустыни на вершинах Хибин. На 10–18 км от комбината распространяется вторая зона с еловым и сосновым сухостоем, которая на снимке выделяется пятнистым коричневым тоном. В третьей зоне на расстоянии 18–25 км от комбината северо-таёжные леса трансформированы в арктические угнетённые елово-берёзовые редколесья [Экология…, 2003].



а б
a b

Рис. 9. Промышленное воздействие: а – Мончегорск; б – Норильск
Fig. 9. Industrial impact: a – Monchegorsk; b – Norilsk

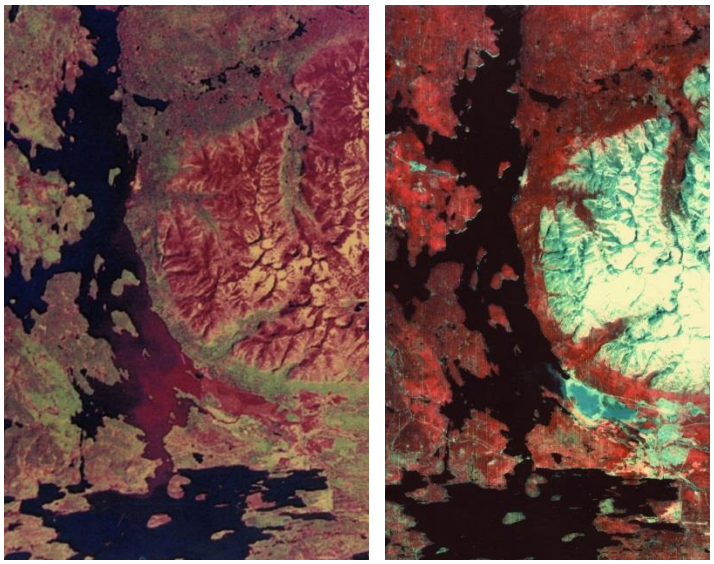
Норильск. На зимнем снимке Норильского горнопромышленного района выделяются мощные дымы промышленных предприятий (рис. 9 б). Промышленные выбросы Норильского медно-никелевого горно-металлургического комбината приводят к загрязнению атмосферы вредными химически активными веществами. Твёрдые выбросы (органическая пыль) улавливаются очистными сооружениями почти полностью, а жидкие и газообразные – в незначительных количествах. Сернистый ангидрид, вступая в реакцию с атмосферной влагой, выпадает затем в виде кислотных дождей. В связи с этим в окрестностях комбината от загрязнения атмосферы промышленными газами страдают леса. Первые признаки гибели лесов под воздействием комбината, который начал работать в конце 1930-х годов, были отмечены уже в конце 1960-х годов. 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. На снимке, сделанном в феврале (рис. 9 б), на светлом фоне снежного покрова выделяются дымовые шлейфы нескольких заводов Норильска и особенно мощный шлейф медеплавильного комбината Надежда, гольцовые вершины хребта Локтокойский Камень с углублением карьера Медвежка и идущими от него по долинам зонами отвалов, сложный фигурный рисунок отвалов

вскрышных пород в районе пос. Кайеркан. Редкостойные леса сохранились лишь на правом берегу реки Норилки.

Защита и рекультивация

Все приведённые выше примеры воспроизводят образ губительного воздействия хозяйственной деятельности на природу. Но снимки фиксируют также и защитную, и восстановительно-рекультивационную деятельность, помогают оценить её результаты.

Рис. 10. Защитная дамба
на озере Вудъявр
Fig. 10. Protective dam
on the Vudyavr Lake



а б
a b

Рис. 11. Загрязнение вод озера Имандра
до и после введения внутреннего водооборота
на комбинате Апатит: а – 1978; б – 1984
Fig. 11. Water contamination in the Imandra Lake
before and after use of incite water circle
at the Apatit Combine: a – 1978; b – 1984

Один из таких примеров приведен на рис. 10. В озеро Малый Вудъявр в Хибинах от Кировского рудника поступают сточные воды. Для предотвращения загрязнения вод горного озера сооружена дамба, и приведённый снимок показывает, что дамба надёжно ограничивает распространение сточных вод.

Другой пример также связан с борьбой за качество поверхностных вод. Так, для озера Имандра на Кольском полуострове на рис. 11 приведен пример благотворного влияния перехода горно-обогатительного предприятия по добыче апатитов в Хибинах на внутренний водооборот. Сравнение снимков со спутника Landsat, полученных в 1978 году, со снимками Ресурс-Ф, сделанными после этого перехода, в 1984 году, показывает резкое уменьшение загрязнения озера.

ВЫВОДЫ

Создавая визуальные образы арктических территорий, космические снимки способствуют лучшему пониманию природных процессов, происходящих в экосистемах криолитозоны в условиях потепления, и изменений экосистем в связи с хозяйственной деятельностью. Приведённые примеры свидетельствуют о значительном потенциале

космических снимков при исследовании и освоении северных территорий и необходимости их использования в научной и практической деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект 18-05-60221.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by RFFI, project 18-05-60221.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Книжников Ю.Ф.* Аэрокосмическое стереомоделирование. М.: Научный мир, 2015. 112 с.
2. Экология Севера: дистанционные методы изучения нарушенных экосистем (на примере Кольского полуострова). М.: Научный мир, 2003. 248 с.
3. Экологический атлас России. М.: ООО «Феория», 2017. 510 с.

REFERENCES

1. *Knizhnikov Yu.F*. Aerospace stereomodelling. Moscow: Scientific world, 2015. 112 p. (in Russian).
2. Ecology of the North: remote sensing methods of disturbed ecosystems investigation (the Kola Peninsula as example). Moscow: Scientific world, 2003. 248 p.
3. Ecological atlas of Russia. Moscow: LLC “Feoriya”, 2017. 510 p.