

ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТРАНСФОРМАЦИЙ ЛАНДШАФТА НА ТЕРРИТОРИИ УРЕНГОЙСКОГО НГКМ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

С.Г. Корниенко, К.И. Якубсон
Институт проблем нефти и газа РАН, e-mail: spaceakm2@ogri.ru

ВВЕДЕНИЕ

Освоение нефтегазовых месторождений неизбежно связано с нарушением состояния природной среды, поэтому уровень антропогенного воздействия необходимо регламентировать и контролировать.

В работе [1] приведено высказывание главного научного сотрудника Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН В.Н. Седых: «Сейчас никто не может сказать, какое количество нарушенных земель в действительности присутствует в районах нефтегазодобычи. Информация подобного рода в нефтегазодобывающих компаниях (если она имеется) является закрытой, а государственные учреждения до сих пор не пытались и не пытаются получить подобные сведения».

Известно, что практически все факторы антропогенного воздействия проявляются на уровне ландшафтов. Изменения структурных и спектральных характеристик земной поверхности могут быть зарегистрированы средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В частности, по данным аэрокосмической съемки могут определяться изменения площади проективного покрытия типов поверхности и, в первую очередь, типов растительности, чувствительных к антропогенным воздействиям, что практически невозможно контролировать средствами наземных наблюдений.

В то же время практически нет методик количественной оценки изменения состояния ландшафтов в нефтегазоносных районах по данным ДЗЗ, учитывающих современный уровень технологий обработки и интерпретации последних и позволяющих получать достоверные и воспроизводимые результаты. В настоящей работе приведены основные положения разрабатываемой в ИПНГ РАН методики оценки антропогенных нарушений ландшафтов, основанной на использовании разновременных космических данных, а также результаты ее применения на участке территории Уренгойского НГКМ. Методические разработки могут быть положены в основу создания соответствующей нормативно-методической документации предприятий нефтегазовой отрасли для широкого использования данных ДЗЗ при решении задач геоэкологического мониторинга.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Промышленное освоение Уренгойского НГКМ было начато в 1978 г. Месторождение протягивается в субмеридиональном направлении почти на 150 км и относится к зоне лесотундры и тундры (см. Приложение, рис. 1). Исследуемый участок месторождения, площадью около 4000 кв. км, захватывает г. Новый Уренгой, перекрывает условные границы контуров месторождения и выходит в область условного фона, где технические объекты практически отсутствуют.

Территория месторождения представлена несколькими морфогенетическими типами ландшафтов, характерными для зон прерывистой мерзлоты. Местность представляет собой плоскую заболоченную, заозеренную равнину с абсолютными отметками водоразделов около 70–80 метров, относительными превышениями в 30–40 метров. Древесная растительность на территории представлена в основном редкостойной лиственницей, с примесью березы и ели. В подлеске кустарники ольхи, ивы, карликовой березки, наземный ярус образован травяно-мохово-лишайниковым сообществом с кустарничками багульника, голубики, морошки. Большие площади занимают безлесые тундровые участки с ивово-ерниковыми кустарниками и осоко-пушице-моховыми болотами.

Основные изменения состояния природной среды происходят при бурении и работе скважин, эксплуатации магистральных, межпромысловых и внутрипромысловых газопроводов, продуктопроводов, компрессорных станций, установок комплексной подготовки газа, дорог, линий электропередач и при возведении жилых объектов. Наиболее заметные изменения обусловлены лесными и тундровыми пожарами, охватывающими большие площади [2, 3]. На свежих гарях после уничтожения теплоизолирующего растительного покрова (РП) увеличивается мощность сезонно-талого слоя (СТС), возрастает тиксотропность грунтов, что в свою очередь активизирует процессы плоскостной эрозии, термокарста, солифлюкции, сползания поверхностных отложений даже на пологих склонах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Спектральные методы анализа данных ДЗЗ оптического диапазона длин волн на сегодняшний день наиболее эффективны для детального изучения процессов трансформации природно-антропогенных комплексов. Выявление изменений может осуществляться путем классификации значимых компонент ландшафта для разных периодов времени с последующим определением разницы в площадях проективного покрытия, а также по

разнице значений информативных спектральных индексов, полученных для разных периодов времени. Оба подхода взаимно дополняют друг друга и, в комплексе, повышают информативность и достоверность оценок [4].

В настоящее время для ретроспективного анализа глубиной в 20–25 лет наиболее приемлемыми считаются снимки спутника Landsat, позволяющие строить тематические карты масштаба 1:100 000 [5, 6]. Исследуемая территория Уренгойского НГКМ характеризуется достаточно большим числом видов РП, в то время как возможности классификации типов поверхности ограничиваются числом спектральных каналов систем ДЗЗ. Тем не менее для характеристики антропогенных трансформаций могут быть использованы несколько хорошо различимых типов поверхности, в первую очередь типов РП, являющихся геоботаническими индикаторами происходящих изменений.

Известно, что техногенные и антропогенные воздействия на данной территории в основном приводят к смене лишайниковых покровов на кустарничковые, травяные и зеленомошные покровы [2]. Исследование спектральных характеристик образцов этой растительности свидетельствует об их хорошей различимости по данным спутника Landsat [7]. Таким образом, эти типы растительности могут быть использованы в качестве геоботанических индикаторов антропогенных трансформаций на данной территории. К их числу отнесен ягель (лишайник вида *Cladonia rangiferina*), поскольку он очень чувствителен к антропогенным воздействиям и восстанавливается при благоприятных условиях нескольких десятков лет. Оленьи пастбища (ягельники) отнесены к наиболее уязвимым звеньям экологических систем на осваиваемых территориях севера Западной Сибири. Можно утверждать, что изменение площади ягельников является одним из основных показателей динамики антропогенного стресса на данных территориях.

Хорошо различимыми типами поверхности, традиционно характеризующими антропогенные трансформации ландшафта, являются водные поверхности, открытые грунты (глины, песчаники), технические объекты. Увеличение площади песчаников, удаленных от технических объектов, характеризует процессы выветривания, дефляции [3]. Следует отметить, что спецификой данной территории является наличие гарей, возникающих, в основном, при сгорании ягеля. Территории с РП в разных стадиях сукцессии после пожаров представляют собой основной класс типов поверхности, характеризующих антропогенные трансформации на данной территории.

В работе использовались стандартные алгоритмы классификации, представленные в программном комплексе ENVI версии 4.3. Были привлечены снимки спутника Landsat 4 (01.08.1988 г.) и Landsat 7 (5.08.2001 г.) с пространственным разрешением 30 м, а также космический фотоснимок на пленку СН-10, полученный с помощью фотокамеры КФА-1000 спутника «Ресурс-01» (15 июля 1988 г.), с более высоким (7 м) пространственным разрешением, охватывающий несколько тестовых площадок (~ 1 кв.км) и участки наземных наблюдений. Близость дат съемки по сезону исключает различия в спектральных характеристиках РП, связанные с фенологическими фазами. В работе также использовались топографическая и геоботаническая карты территории Уренгойского НГКМ масштаба 1:100 000.

В августе 2005 г. на данной территории проводились наземные наблюдения, во время которых с помощью GPS-приемника было определено местоположение обучающих и контрольных участков с относительно однородным покровом ягеля, зеленого мха, сплошного лесного массива, песчаников и водной поверхности, а также участков, отнесенных к гарям. Для классификации было выбрано 7 типов поверхности: *ягель* (лишайник), *мох* (зеленый мох), *зелень* (кустарничковая, древесная и прочая растительность с высоким содержанием хлорофилла), *вода* (все водные поверхности), *гары* (участки недавних пожаров), *технические объекты* (все промышленные и хозяйственные строения), *пески* (песчаные карьеры, отмели). На рис. 2 (см. Приложение) даны графики коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) для классифицируемых типов поверхностей, определенных по данным спутника Landsat 4 на основе обучающих участков.

К классу «зелень» отнесены участки сплошного лесного массива, представленного в основном лиственницей, поскольку они достаточно контрастно выделяются на фоне типичной тундровой растительности, в первую очередь за счет высокого содержания хлорофилла. Однако по этой же причине они плохо отделимы от участков сплошного покрова кустарничковой, травяной растительности, а также молодого зеленого мха, что, в итоге, предопределило объединение их в один класс.

Следует отметить, что особенностью района является пространственное слияние большинства технических объектов и песчаников, поскольку в условиях сплошной и прерывистой мерзлоты практически все строительство (за исключением надземных трубопроводов) осуществляется с песчаной отсыпкой под основание объектов. В этой связи классы песчаников и технических объектов в дальнейшем объединялись в один класс.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ LANDSAT 4,7

Оценка изменений состояния РП осуществлялась на основе методов классификации и по изменению спектральных индексов. Классификация осуществлялась по различным алгоритмам на основе данных 6 спектральных каналов видимого и ближнего ИК-диапазонов спутника Landsat 4 1988 г. съемки. Для сравнения были оставлены результаты обработки по алгоритмам *Махалобиса*, *Максимума правдоподобия* и *Минимальных расстояний*, по которым расхождение в значениях площади класса «ягель» не превышало 10% от значения площади этого класса, определенного по снимку КФА-1000.

Водные поверхности достаточно хорошо отделяются по спектральным признакам, тем не менее по алгоритму *Максимума правдоподобия* произошло перепутывание значительной части водоемов и технических объектов, в результате чего площадь водоемов оказалась заниженной. Алгоритм *Махалобиса* показал завышенную площадь проективного покрытия ягелем на территории южнее г. Новый Уренгой, что сильно расходится с результатами по двум другим алгоритмам. В итоге наиболее достоверной в данном случае можно считать классификацию по алгоритму *Минимальных расстояний*. Аналогичная классификация с использованием этого алгоритма была проведена по данным спутника Landsat 7 2001 г. съемки (см. Приложение, рис. 3). Значения и иллюстрации карт площадей проективного покрытия типами поверхности (в %) и их изменение на всей исследуемой территории и ее части в границах лицензионного участка приведены в таблице 1 и на рис. 3 (см. Приложение). Черными контурами на рисунке обозначены границы лицензионного участка.

Для характеристики трансформаций РП также использовались спектральные индексы NDVI и SWVI. Индекс $NDVI = (Ch4 - Ch3) / (Ch4 + Ch3)$, где Ch3 и Ch4 – значение спектральной яркости в 3 и 4 спектральных каналах сканера Landsat, характеризует содержание хлорофилла в РП, и по разности его значений могут быть установлены участки увеличения и уменьшения его содержания в покрове. К зонам растительности были отнесены участки типичных тундровых покровов со значением $NDVI > 0,15$ [8, 9].

Индекс $SWVI = (Ch5 - Ch4) / (Ch5 + Ch4)$ рассчитан по значениям КСЯ в ближней и средней ИК-области спектра [10] и интересен тем, что его положительные значения характеризуют площадь гарей, техногенных объектов и песков, а все отрицательные – классы растительности и водоемов (см. Приложение, рис. 2).

Таблица 1

Результаты классификации по алгоритму *Минимальных расстояний*

Данные	Занимаемая площадь по классам, %					
	ягель	мох	зелень	вода	Гари	технические объекты
Вся исследуемая территория						
1988 г.	15,23	59,03	2,93	7,64	7,61	7,56
2001 г.	9,54	61,49	7,24	8,18	5,92	7,63
Разница 2001 и 1988 г.	- 5,69	2,46	4,31	0,54	- 1,69	0,07
Часть исследуемой территории в границах лицензионного участка						
1988 г.	12,97	57,40	2,02	5,43	8,72	13,46
2001 г.	8,53	60,93	6,90	5,63	5,34	12,67
Разница 2001 и 1988 г.	- 4,44	3,53	4,88	0,20	- 3,38	-0,79

Классы водных поверхностей и технических объектов (включая пески), выделенные по данным 1988 и 2001 гг. съемки, по этим параметрам в динамике не анализировались. Они объединялись и маскировались, составляя в сумме 18,5%. Характеристика трансформаций РП по индексам NDVI и SWVI дана в таблице 2 и на рис. 4 (см. Приложение). Область фоновых значений (без изменений) определялась по эталонным участкам, отнесенным к ненарушенным территориям.

В целом изменения по обоим индексам характеризуют преобладание процессов восстановления РП на данном отрезке времени, однако индекс SWVI гораздо более чувствителен, по сравнению с NDVI. Этот факт может быть связан с тем, что для участков тундровой растительности с предельно низким содержанием хлорофилла процессы поражения и сукцессии не сопровождаются заметным изменением его содержания.

Картина изменения индекса SWVI за период с 1988 по 2001 гг. отражает все основные трансформации РП, прошедшие с начала освоения месторождения, т.е. с 1978 г., поскольку все зоны развития РП относятся к территориям, претерпевшим антропогенный стресс до 1988 г. Подтверждением тому могут служить результаты ретроспективного анализа серии панхроматических космических снимков, полученных камерами КФА-1000 и КАТЭ-200 за 1976, 1979, 1988 и 1993 гг. съемки на отдельные участки этой территории

[11]. Таким образом, с уверенностью можно утверждать, что к 2001 г. как минимум 24,0% (19,5% + 4,5%) площади исследуемой территории, не считая площади самих технических объектов, претерпели антропогенное воздействие.

Таблица 2

Процентное соотношение площадей развития и деградации РП за период с 1988 по 2001 гг. (по изменению индексов NDVI и SWVI)

	Неизмененные территории, %	Зоны развития РП, %	Зоны деградации РП, %
NDVI	68,8	8,8	3,9
SWVI	57,5	19,5	4,5

Уменьшение площади ягеля происходит не только за счет его сгорания или механического снятия. При визуальном дешифрировании это отчетливо проявляется на территории ягельников в правой верхней части карты (зона А, см. Приложение, рис. 3), преимущественно за пределами границы лицензионного участка. Этот факт не может быть связан с ошибками в обработке данных, поскольку в левой нижней части аналогичные по классу небольшие участки практически не изменились (зона Б, см. Приложение, рис. 3). Возможно, что уменьшение площади ягеля связано с трансграничным переносом загрязнения по воздуху или в подземной гидросфере, однако не исключена связь с другими антропогенными факторами. На исследуемой территории постепенное сокращение площади ягеля, не связанное с пожарами, составляет в среднем около 0,1% в год, и оно очень неравномерное. На участке незначительно увеличилась площадь водоемов и практически не изменилась площадь технических объектов и песков, что в целом характеризует стабильность техногенной нагрузки.

Результаты классификации типов поверхности для части исследуемой территории в границах лицензионного участка также приведены в таблице 1. Основные тенденции изменения в площадях проективного покрытия те же, что и для всей исследуемой территории, однако сокращение площади ягеля здесь меньше, чем для всей территории, что свидетельствует об увеличении антропогенного воздействия за пределами лицензионного участка. Эту же тенденцию характеризуют изменения площади гарей и технических объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 1978 г., с начала освоения месторождения, по 2001 г. на исследуемой территории антропогенному воздействию подверглось не менее 31,6% площади, из них порядка 7,6% за счет строительства объектов и 24,0% из-за сопутствующих пожаров. Период с 1988 по 2001 г. характеризуется стабильной эксплуатацией Уренгойского месторождения, когда основные промышленные и хозяйственные объекты уже построены и антропогенная активность в освоении территории невысока. За этот период площадь проективного покрытия ягеля как основного геоботанического индикатора антропогенной нагрузки уменьшилась на 5,7%, что в несколько раз меньше по сравнению с аналогичным периодом с начала освоения месторождения.

Полученные результаты показывают, что зоны изменения состояния поверхности в основном приурочены к техническим объектам. Несмотря на локальные нарушения природной среды, период с 1988 по 2001 г. в целом характеризуется фазой развития вторичных видов РП. В первые годы после пожаров или нарушения РП на месте ягеля произрастает кустарниковая растительность, злаковые травы и зеленые мхи, о чем свидетельствует увеличение площади классов «зелени» и «мха». В то же время увеличение площади территорий, относящихся к классу «зелень», частично может происходить за счет прироста древесной растительности, в первую очередь лиственницы. Подобные тенденции распространения лиственницы на север из лесотундры в тундру связываются с глобальным изменением климата за последние десятилетия [5]. Незначительно увеличилась площадь водоемов и практически не изменилась площадь технических объектов и песков, что характеризует стабильность техногенной нагрузки.

В целом полученные результаты свидетельствуют об эффективности комплексного применения алгоритмов классификации и спектральных индексов, рассчитанных по данным многозональной космической съемки для оценки влияния техногенных факторов при освоении нефтегазовых месторождений в районах тундры и лесотундры. Следует отметить, что, поскольку достоверность классификации типов поверхности по данным ДЗЗ в каждом конкретном случае существенным образом зависит от применяемого алгоритма, в исследованиях подобного рода обязательным условием является опробование нескольких алгоритмов и обоснование выбора тех из них, которые обеспечивают получение максимально достоверного результата.

Работа выполнена в рамках программы ОНЗ РАН №12 «Природные и социально-экономические факторы изменения окружающей среды», проект «Современные процессы трансформации природно-антропогенных комплексов в основных нефтегазодобывающих регионах России».

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьянов А.А., Андреева Н.Н., Крюков В.А., Лятс К.Г. Стратегия использования попутного нефтяного газа в Российской Федерации. М.: ЗАО «Редакция газеты “Кворум”», 2008. 320 с.
2. Антропогенные изменения экосистем Западно-Сибирской газоносной провинции / Под ред. Н.Г. Москаленко. М.: Ин-т криосферы Земли, 2005. 357 с.
3. Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / Под ред. Е.С. Мельникова и С.Е. Гречищева. М.: ГЕОС, 2002. 402 с.
4. Thomson A.G. A multi-temporal comparison of two similar Landsat Thematic Mapper images of upland North Wales, U.K. // Int. J. Remote Sensing. 1992. Vol. 13, № 5. P. 947-955.
5. Харук В.И., Им С.Т., Рэнсон К. Дж., Сан Г. Космоснимки высокого разрешения в анализе временной динамики экотона лесотундры // Исследование Земли из космоса. 2005. №6. С. 46-55.
6. Андреев Г.Г., Беляева Н.В., Чабан Л.Н. Комплексное использование материалов космической и аэрофотосъемки в Геоинформационных технологиях экологического мониторинга труднодоступных территорий Сибири и Крайнего Севера // Исследование Земли из космоса. 2004. №4. С. 63-72.
7. Лавриненко И.А., Лавриненко О.В. Применение спектрально-зональных космических снимков при изучении лишайников как компонентов тундровых экосистем // Вестник Института биологии, №10 от 28 июля 1998 г. (<http://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/98-10/05-10.html>).
8. Huete A.R. Environmental monitoring with remote sensing // J. Artiola. N.Y., 2004. Chap. 11, P. 183-206.
9. Елсаков В.В., Плюснин С.Н., Щанов В.М. Технологии дистанционного зондирования в исследовании свойств растительных сообществ бассейна р. Новая Нерута // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физиче-

ские основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сб. науч. ст. М.: ООО «Азбука-2000», 2006. Вып. 3, т. II. С. 315-319.

10. *Stroppiana D., Pinnock S., Pereira J.M.C., Gregorie J.-M.* Radiometric analysis of SPOT-VEGETATION images for burnt area detection in Northern Australia // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 82. P. 21–37.
11. *Корниенко С.Г., Якубсон К.И., Масленников В.В.* Изучение трансформаций природных комплексов нефтегазоносных областей криолитозоны по данным космической съемки // *Наука и техника в газовой промышленности*. 2005. №3. С. 71-77.

ПРИЛОЖЕНИЕ

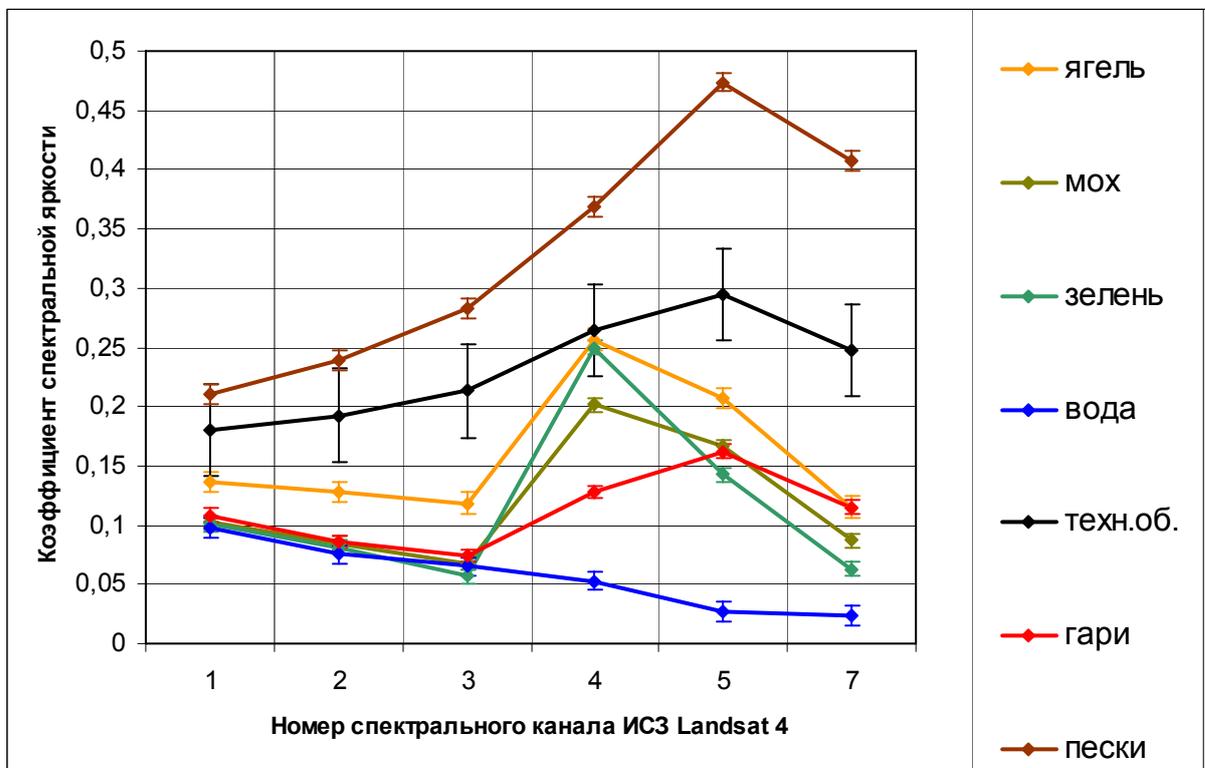


Рис. 2. Спектральное распределение коэффициентов яркости для классифицируемых типов покрова по данным спутника Landsat 4. Вертикальные штрихи на графике соответствуют удвоенным величинам среднеквадратичного отклонения (СКО)

ПРИЛОЖЕНИЕ

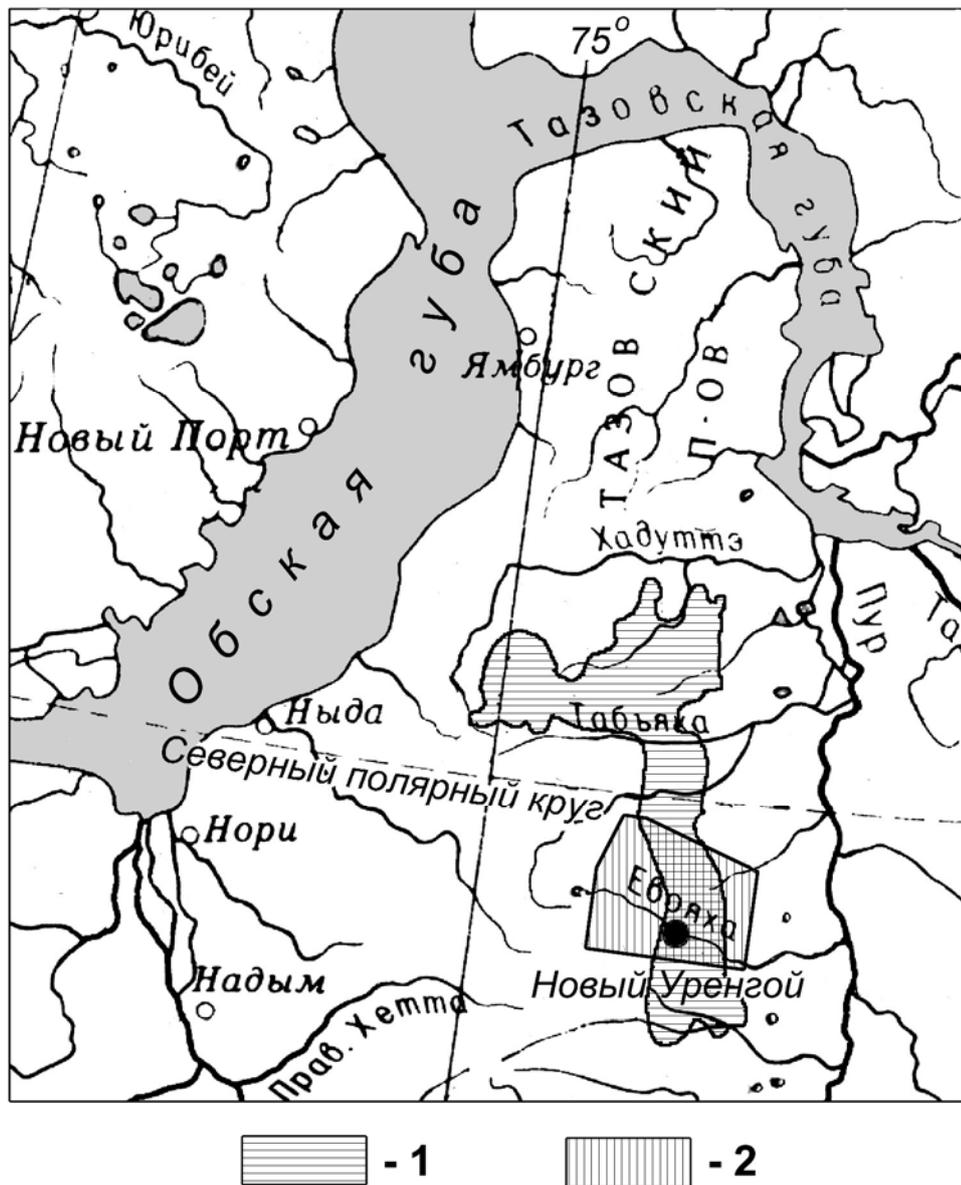


Рис. 1. Схема расположения района исследований: 1 – территория Уренгойского НГКМ; 2 – исследуемая территория по данным съемки с ИСЗ Landsat

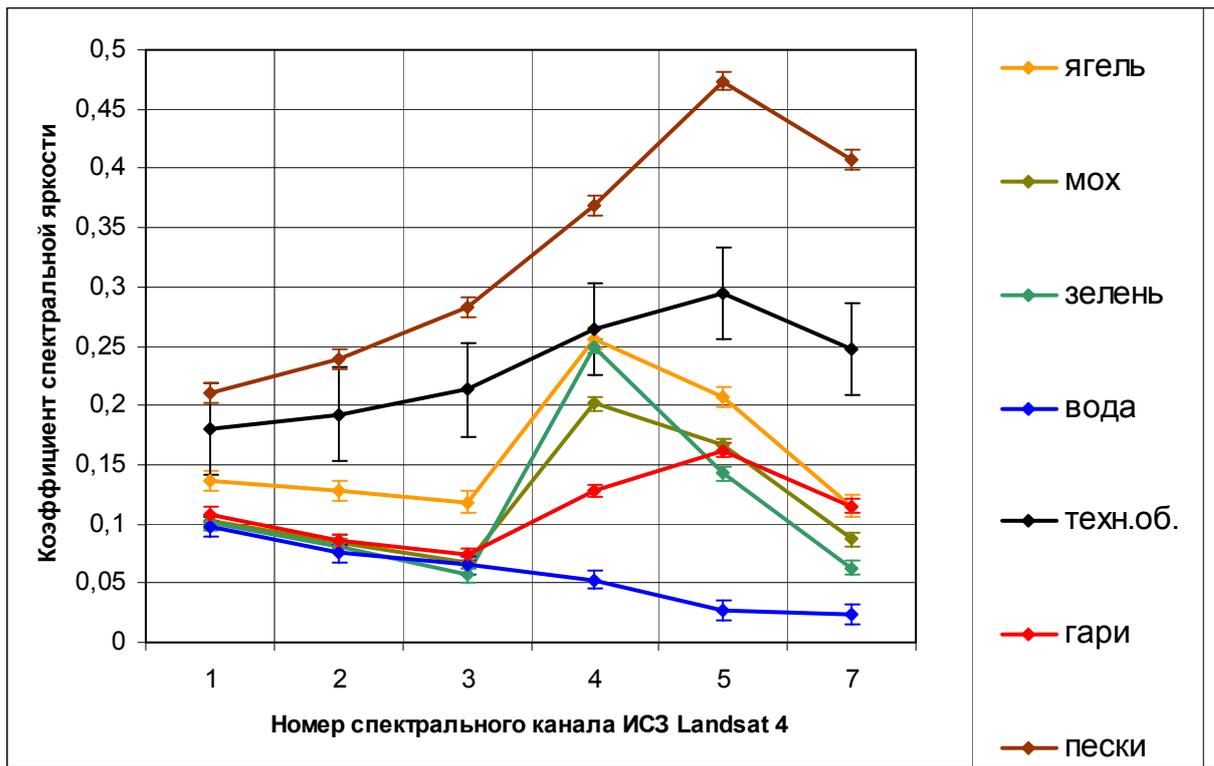


Рис. 2. Спектральное распределение коэффициентов яркости для классифицируемых типов покрова по данным спутника Landsat 4. Вертикальные штрихи на графике соответствуют удвоенным величинам среднеквадратичного отклонения (СКО)

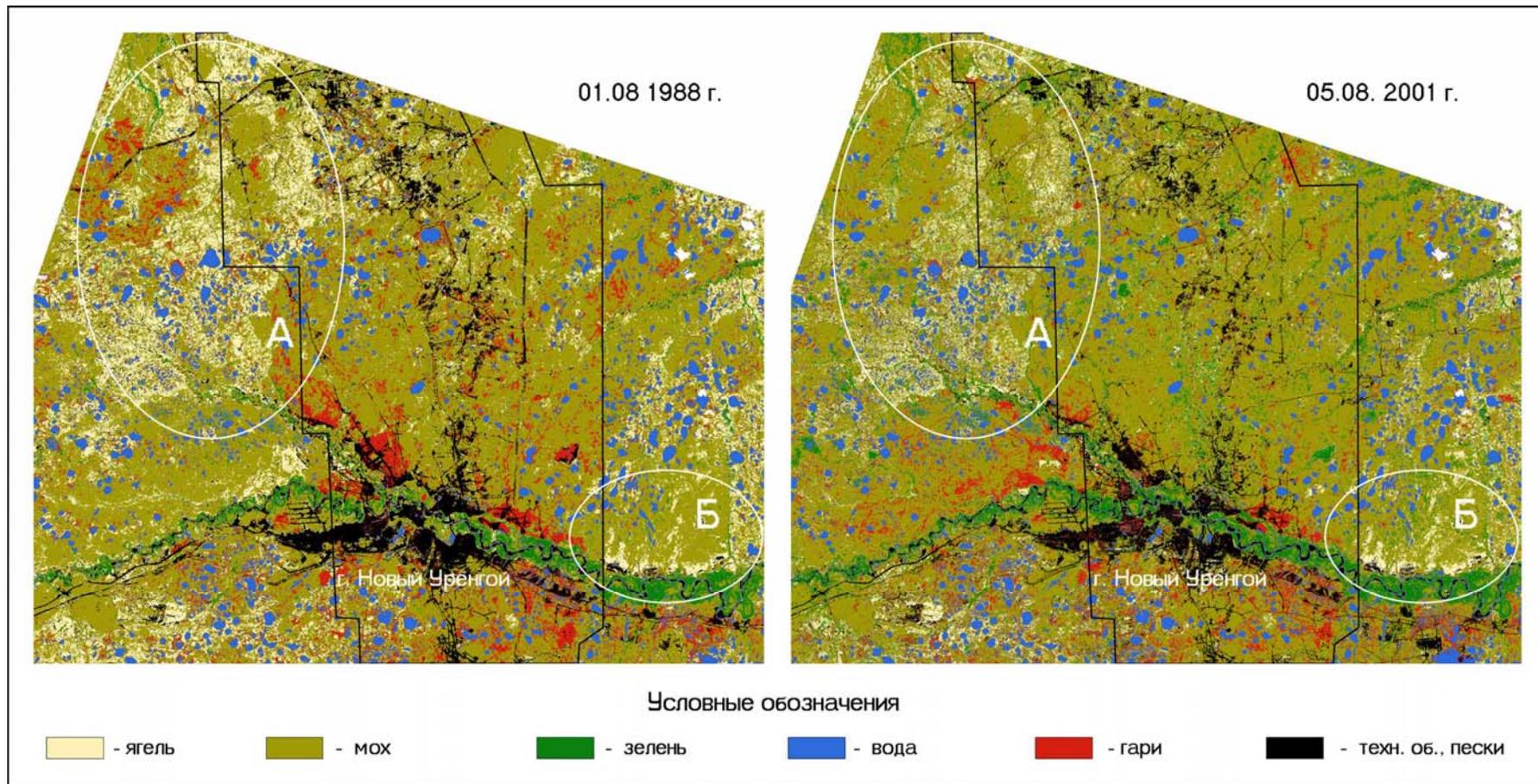


Рис. 3. Иллюстрация карт проективного покрытия классифицированных типов поверхности по данным съемки с ИСЗ Landsat 1988 (а) и 2001 (б) годов съемки

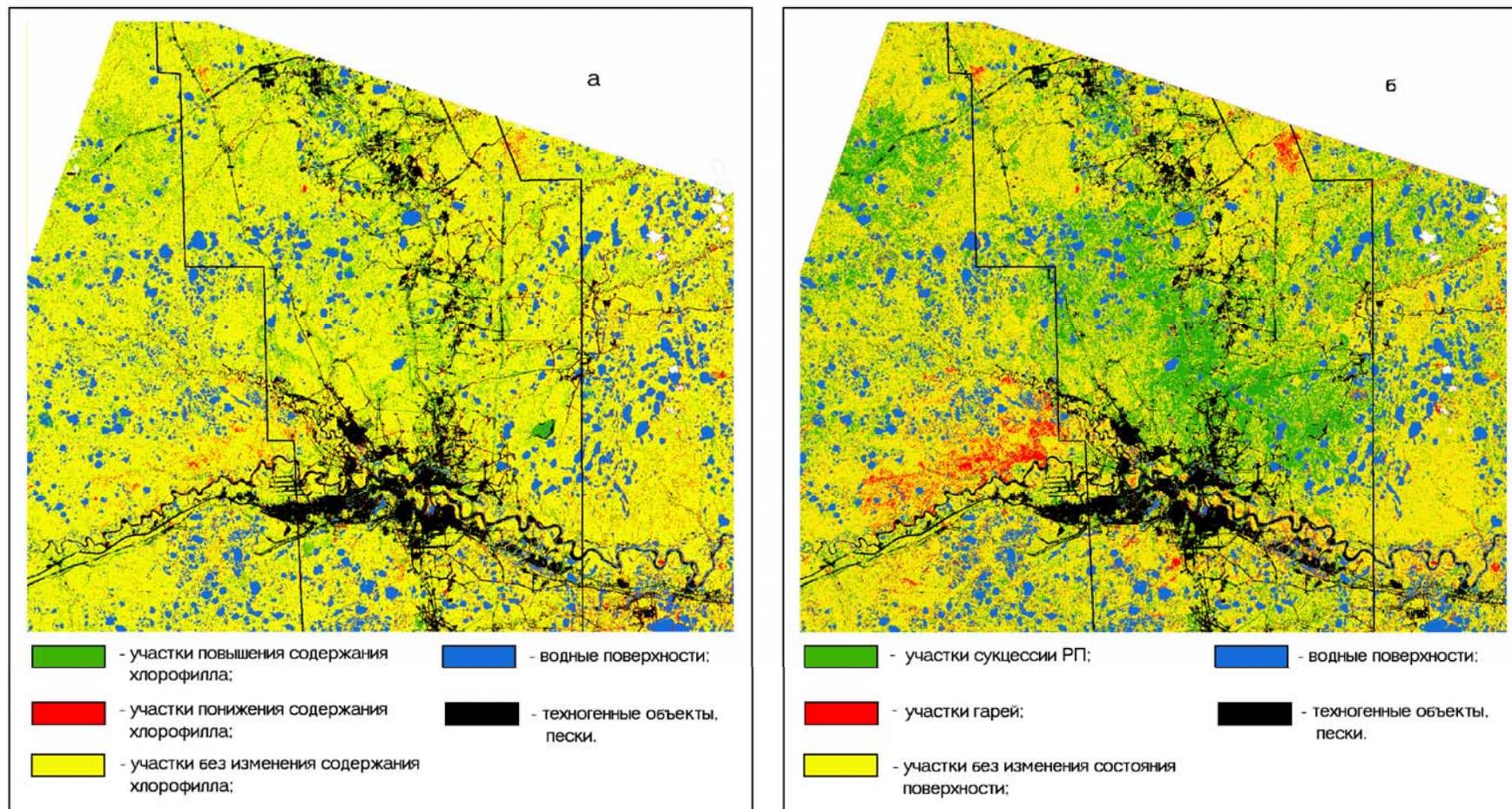


Рис. 4. Иллюстрация карт изменения поверхностных покровов за период с 1988 по 2001 г. по спектральным индексам NDVI (а) и SWVI (б)