

Характеристика изменений влажности тундрового покрова в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat

С.Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия
E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Аннотация. На примере района длительной техногенной нагрузки Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения показана возможность мониторинга влажности тундрового покрова вблизи технических объектов по данным спутников Landsat 5 и Landsat 8. В работе использовались мультиспектральные снимки 1990, 1994, 2013 и 2020 гг. Анализ проводился по изображениям, характеризующим температуру земной поверхности, влажность поверхности (индекс NDWI) и содержание хлорофилла в покрове (индекс NDVI). Характеристика и картографирование изменений влажности покрова проводились по разности изображений 1990 и 2020 гг. Вариации индекса NDVI позволяют установить причины этих изменений. Показано, что техногенное воздействие преимущественно приводит к повышению температуры поверхности и снижению значений NDWI и NDVI, что свидетельствует о преобладании процессов дренирования и уменьшения объема живой фитомассы вблизи технических объектов. Подобные трансформации менее опасны для объектов по сравнению с переувлажнением покрова, однако способствуют росту эмиссии углеродосодержащих газов, поскольку повышение температуры и снижение влажности поверхности, как правило, ведут к деградации мерзлоты и увеличению глубины талого слоя.

Ключевые слова: мониторинг, влажность поверхности, спутники Landsat, температура, индекс NDWI, индекс NDVI, тундровый покров, технические объекты, Бованенковское месторождение.

Для цитирования: Корниенко С.Г. Характеристика изменений влажности тундрового покрова в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Актуальные проблемы нефти и газа. 2021. Вып. 4(35). С. 30–48. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-35.art4>

Введение

Стабильность состояния криогенных ландшафтов при промышленном освоении территорий Крайнего Севера является важнейшим условием обеспечения безопасности функционирования технических объектов и сохранения уникальной природной среды. Признаком нестабильного состояния участков может быть относительно высокая изменчивость (вариативность)

биофизических характеристик поверхности. Строительство промышленных и инфраструктурных объектов на участках с относительно плоским рельефом тундры, как правило, приводит к нарушению естественных условий стока поверхностных вод и, как следствие, к перераспределению влаги в грунте, в почвенно-растительном покрове, изменению площади проективного покрытия и видового состава растительности [1–3].

В районах широкого распространения пластовых льдов, залегающих близко к поверхности, и повторно-жильных льдов, изменения фитоценозов и температурно-влажностного режима (степени дренирования) поверхности относятся к числу основных причин активизации таких опасных процессов, как термокарст, термоденудация, термоэрозия, подтопление, пучение, заболачивание, солифлюкция. Выявление участков изменения влажности поверхности относится к числу приоритетных задач геоэкологического мониторинга территорий расположения объектов нефтегазового комплекса в криолитозоне [4].

Вопросам трансформаций тундрового ландшафта в районе Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), расположенного на полуострове Ямал, посвящено не так много публикаций. В работе [5] рассматриваются возможности использования данных дистанционного зондирования Земли различного пространственного разрешения для дешифрирования объектов строительства на Бованенковском месторождении и явных нарушений тундрового напочвенного покрова, в основном, связанных с разездом гусеничного транспорта. На основе ландшафтно-экологического метода построены карты стрессового воздействия техногенных объектов на природные комплексы месторождения [6]. Учитывая широкое распространение пластовых льдов в районе Бованенковского НГКМ, в условиях существующих климатических трендов и интенсивной техногенной нагрузки прогнозируется активизация деструктивных мерзлотных процессов [7]. На основе материалов разновременной аэро-, фото- и

космосъемки с конца 80-х годов проанализированы структурно-динамические изменения растительного покрова при освоении месторождения и выявлены основные тенденции сукцессий, вызванных техногенными факторами [2]. С использованием космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения (КСВР) для участка наиболее длительной антропогенной нагрузки в южной части месторождения построены карты изменения площадей проективного покрытия и видового состава растительности, а также изменения гидрологической ситуации за период с 2004 по 2016 гг. [8]. Вместе с тем практически нет данных, характеризующих пространственно-временные вариации и основные тенденции изменения влажности поверхности тундровых ландшафтов на участках, не занятых под строительство объектов, но находящихся в непосредственной близости к ним.

Ранее рассматривалась возможность использования разновременных КСВР для мониторинга и крупномасштабного картографирования участков изменения влажности тундрового напочвенного покрова [9]. К преимуществам использования космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения для этих целей следует отнести высокую детальность (~ 3 м), что актуально при планировании конкретных защитных геотехнических мероприятий. Недостатком считается невысокая чувствительность используемых спектральных каналов к вариациям влажности поверхности, например, по сравнению с каналами радиометров спутников Landsat.

Кроме того, относительно небольшая полоса обзора КСВР в ряде случаев не позволяет провести одномоментную съемку территорий, охватывающих районы строительства и районы ненарушенного состояния ландшафтов, что необходимо для корректной оценки изменений изучаемого района. Ключевое значение также имеют доступность данных и более длительный период работы однотипных космических систем, что позволяет проводить анализ с учетом снимков более раннего времени, в том числе до начала освоения территорий. Для характеристики изменений влажности поверхности в районе Бованенковского месторождения предъявленным требованиям в наибольшей мере отвечают космические снимки спутников Landsat, опыт применения которых для этих целей описан в работе [10]. Цель настоящей работы – характеристика изменений влажности поверхности тундрового напочвенного покрова на южном своде Бованенковского НГКМ по данным спутников Landsat за период его освоения с 1990 по 2020 гг.

Характеристика района исследований

Район расположения Бованенковского месторождения в центральной части полуострова Ямал (рис. 1 а) относится к северным субарктическим тундрам сплошного распространения многолетнемерзлых пород с подземными льдами различного генезиса, значительная часть которых залегает достаточно близко к поверхности [11]. Для исследований была взята территория размерами 50×50 км (рис. 1 б),

охватывающая по периферии ненарушенные (фоновые) участки с относительно стабильным состоянием фитоценозов. Промышленные и инфраструктурные объекты, построенные к 2020 г., расположены в центральной части этой территории (выделено белым тоном на рис. 1 б). Природные ландшафты здесь характеризуются существенной неоднородностью напочвенного покрова, густой сетью рек и озер, в основном, термокарстового происхождения, а также большим количеством болот. Районы исследований относятся к равнинным территориям, поверхности преимущественно плоские, растительность представлена лишайниково-моховыми, кустарничково-моховыми, травяно-моховыми сообществами [12]. Напочвенный покров плотный, представлен, в основном, мхами и лишайниками толщиной от 2 до 15 см.

Для характеристики возможных изменений влажности напочвенного покрова был выбран район наиболее длительной и интенсивной техногенной нагрузки размерами 17×15 км на южном своде месторождения (рис. 1 в). Основная часть построенных к 2020 г. объектов расположена в пойменной части района. Месторождение было введено в эксплуатацию в октябре 2012 г. По данным космической съемки заметные нарушения поверхности, связанные, как правило, с уничтожением напочвенного растительного покрова гусеничным транспортом, здесь отмечались с середины 80-х годов прошлого столетия. Строительство объектов было начато в конце 80-х годов и наиболее интенсивно велось в 2009 – 2016 гг.

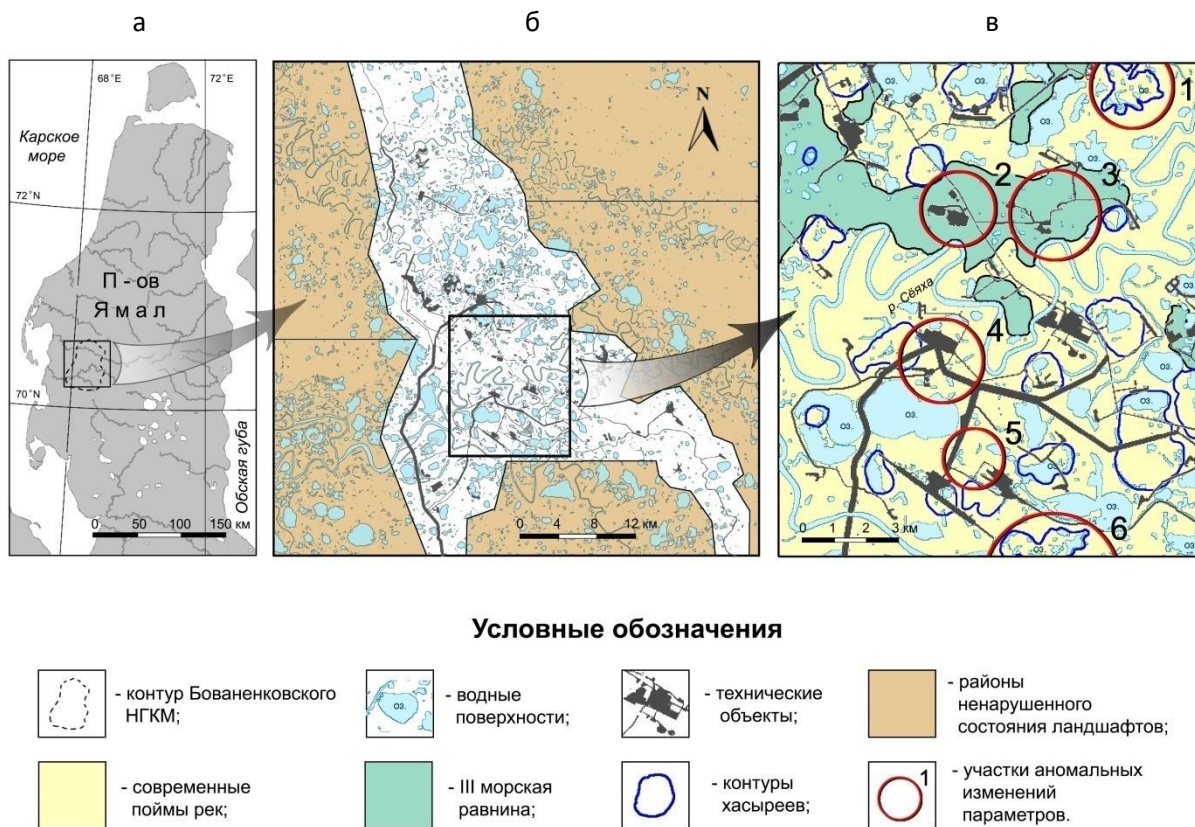


Рис. 1. Схемы расположения территории исследований: а – на п-ове Ямал, б – районов ненарушенного состояния ландшафтов и строительства объектов, в – района наиболее длительной техногенной нагрузки на южном своде Бованенковского НГКМ

Исходные данные и методика исследований

В работе использовались мультиспектральные снимки со спутников Landsat 5 (20.07.1990 г., 15.07.1994 г.) и Landsat 8 (19.07.2013 г.; 20.07.2020 г.) полуденного времени съемки. При выявлении изменений отбирались снимки с близкими датами съемки, что позволяет минимизировать ошибки, связанные с различием фенологических фаз состояния ландшафта. Предварительная обработка снимков включала геометрическую коррекцию, калибровку спектральных каналов, формирование фрагментов изображений на исследуемую территорию (см. рис. 1 б). Для характеристики и картографирования изменений влажности

(степени дренирования) поверхности использовались изображения температуры поверхности Земли – параметр LST (Land Surface Temperature) [13] и нормализованный дифференциальный индекс влажности поверхности NDWI (Normalized Difference Water Index) [14]. Параметр LST, рассчитанный по данным спектральных каналов дальней тепловой инфракрасной (ИК) области, чувствителен к интенсивности транспирации и тепловой инерции тундрового почвенно-растительного покрова, которые однонаправленно зависят от влажности покрова. Участки повышенной влажности покрова в полуденное время суток характеризуются более низкими значениями LST по сравнению с дренированными участками [10, 15].

Индекс NDWI, рассчитанный по данным спектральных каналов ближней ИК области, чувствителен к влаге на поверхности покрова и повышается при увеличении толщины водной пленки [14].

Использование параметров LST и NDWI с различными физическими принципами индикации влажности позволяет повысить достоверность выделения аномальных зон и снизить вероятность ошибки из-за влияния случайных факторов [10]. В то же время возможны условия (метеорологические, фенологические), при которых толщина водной пленки на поверхности не связана функционально с количеством влаги в почвенно-растительном покрове. В этих случаях возможно различие в положении участков аномальных изменений влажности по параметрам LST и NDWI. В настоящей работе анализировались участки аномальных изменений влажности, выделяемые одновременно по обоим параметрам.

Вариации влажности поверхности тундрового почвенного покрова могут быть обусловлены разными причинами, в том числе, в результате изменения площади проективного покрытия растительности, ее состояния или видового состава. В этой связи, для уточнения причин формирования аномальных зон LST и NDWI использовались изображения нормализованного дифференциального вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [16], чувствительного к содержанию хлорофилла в растительном покрове. Для выделения и маскирования водных объектов использовались изображения модифицированного индекса MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) [17]. Маска объектов строительства формировалась по значениям индекса $NDVI < 0,18$, а также визуально, методами

ландшафтно-индикационного дешифрирования RGB-синтезированных изображений Landsat.

Мультиспектральные снимки Landsat имеют пространственное разрешение 30 м в видимой, ближней и средней ИК области спектра. В дальней тепловой ИК области пространственное разрешение снимков спутника Landsat 5 составляет 120 м, а Landsat 8 – 100 м. Как правило, такая детальность съемки допустима при построении тематических карт масштаба 1:50000 – 1:100000. При дополнительной специальной обработке изображений возможно выделение аномальных зон и в более крупном масштабе [10]. В данном исследовании карты на основе изображений параметров LST, NDWI и NDVI строились в масштабе 1:100000. Радиометрическое разрешение сканеров TM и TIRS спутников Landsat 5 и Landsat 8 в дальней ИК области составляет 0,4 К по шкале радиационной температуры. Параметр LST рассчитывается с аналогичным температурным разрешением.

При выявлении изменений параметров по разновременным данным космической съемки неизбежны погрешности, связанные с различием углов и времени съемки, пропускания атмосферы, метеорологических условий, калибровочных данных, фенологического состояния ландшафтов. Различие метеорологических условий оказывает наиболее существенное влияние на распределение параметра LST, чувствительного к колебаниям температуры воздуха. Для минимизации погрешностей подобного рода применяются методы относительной радиометрической нормализации, когда все изображения преобразуются и приводятся к условиям съемки одного, выбранного в качестве эталона, изображения.

Подобный подход эффективен при относительных методах анализа, когда изменения параметров в зоне очевидных или предполагаемых трансформаций поверхности оцениваются относительно районов стабильного (фоновое) ненарушенного состояния. В этом случае возможное влияние глобальных и региональных климатических трендов на вариации параметров также устраняется. В настоящей работе относительная радиометрическая нормализация изображений параметров LST, NDWI и NDVI проводилась в соответствии с методикой, описанной в работе [18]. Согласно этой методике, уравнения регрессии для преобразования (нормализации) изображений и погрешности нормализации определялись на основе значений параметров по районам фонового ненарушенного состояния ландшафтов. В данном случае в качестве эталонного был выбран снимок спутника Landsat 5 1990 г., относительно которого нормализовались изображения параметров съемок 1994, 2013 и 2020 гг. Значения погрешностей нормализации изображений не превышают для параметра LST $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для безразмерных параметров NDWI и NDVI – $0,04$.

На рис. 1 б светло-коричневым тоном обозначены районы фонового ненарушенного состояния ландшафтов, относительно которых проводилась процедура нормализации, и оценивались изменения параметров в районе расположения технических объектов на южном своде месторождения (см. рис. 1 в). Область расположения всех технических объектов, построенных к 2020 г., на рис. 1 б обозначена белым тоном. После нормализации изображения имеют идентичные шкалы значений по каждому параметру, соответствующие шкалам параметров эталонных изображений. Для

картографирования изменений влажности распределения параметров более ранней съемки вычитались из распределений более поздней съемки. Все приведенные в настоящей работе распределения параметров и распределения их разности даны с динамическими диапазонами значений, соответствующих доверительному интервалу 99%. Обработка и все преобразования мультиспектральных снимков Landsat проводились с использованием программного комплекса ENVI 5.3.

Результаты и их обсуждение

Согласно результатам проведенных ранее исследований [10], данные спутника Landsat позволяют по изображениям параметров LST и NDWI охарактеризовать и картографировать пространственную неоднородность влажности (степени дренирования) поверхности тундровых ландшафтов. На рис. 2 приведены изображения, характеризующие распределения параметров LST (а, б), NDWI (в, г) и NDVI (д, е) съемок 1990 и 1994 гг. Границы между поймой и останцами III морской равнины на рисунках даны белыми контурами, остальные условные обозначения приведены на рис. 1. Участки относительно более «сухих» (дренированных) поверхностей, занимающие около 16% площади, отображены на распределениях LST и NDWI грациями светло-коричневого тона. Значения вегетационного индекса $\text{NDVI} < 0,18$ (грации светло-коричневого тона) соответствуют участкам без напочвенного растительного покрова.

В 1990 г. еще не было развернуто полномасштабное строительство, хотя по индексу NDVI отмечаются участки 2 и 3 (см. рис. 2 д) с уничтоженным ранее напочвенным покровом.

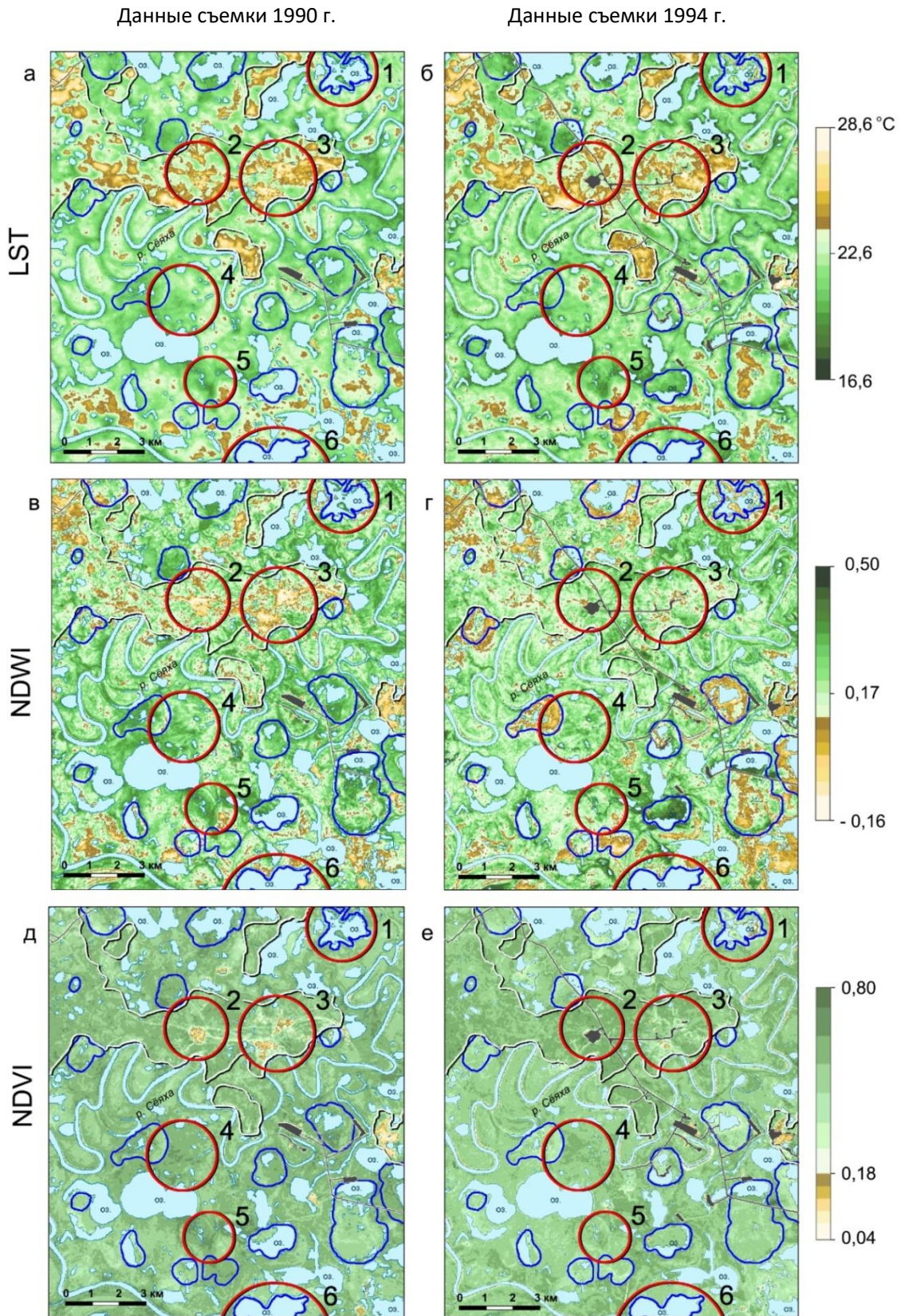


Рис. 2. Распределения значений: а, б – LST, в, г – NDWI, д, е – NDVI по данным съемок 1990 г. и 1994 г.

Предполагается, что до 1990 г. отсутствовали какие-либо значимые антропогенные (техногенные) воздействия на ландшафты исследуемого района. В этой связи изменения влажности поверхности, связанные со строительством и функционированием технических объектов, оценивались относительно состояния ландшафтов

1990 г. К 1994 г. была построена дорога и несколько объектов (см. рис. 2 б, г, е).

На рис. 3 приведены распределения разности параметров LST (а), NDWI (б) и NDVI (в), рассчитанные по данным съемок 1990 и 1994 гг. Границы водных поверхностей и технических объектов соответствуют их состоянию в 1994 г.

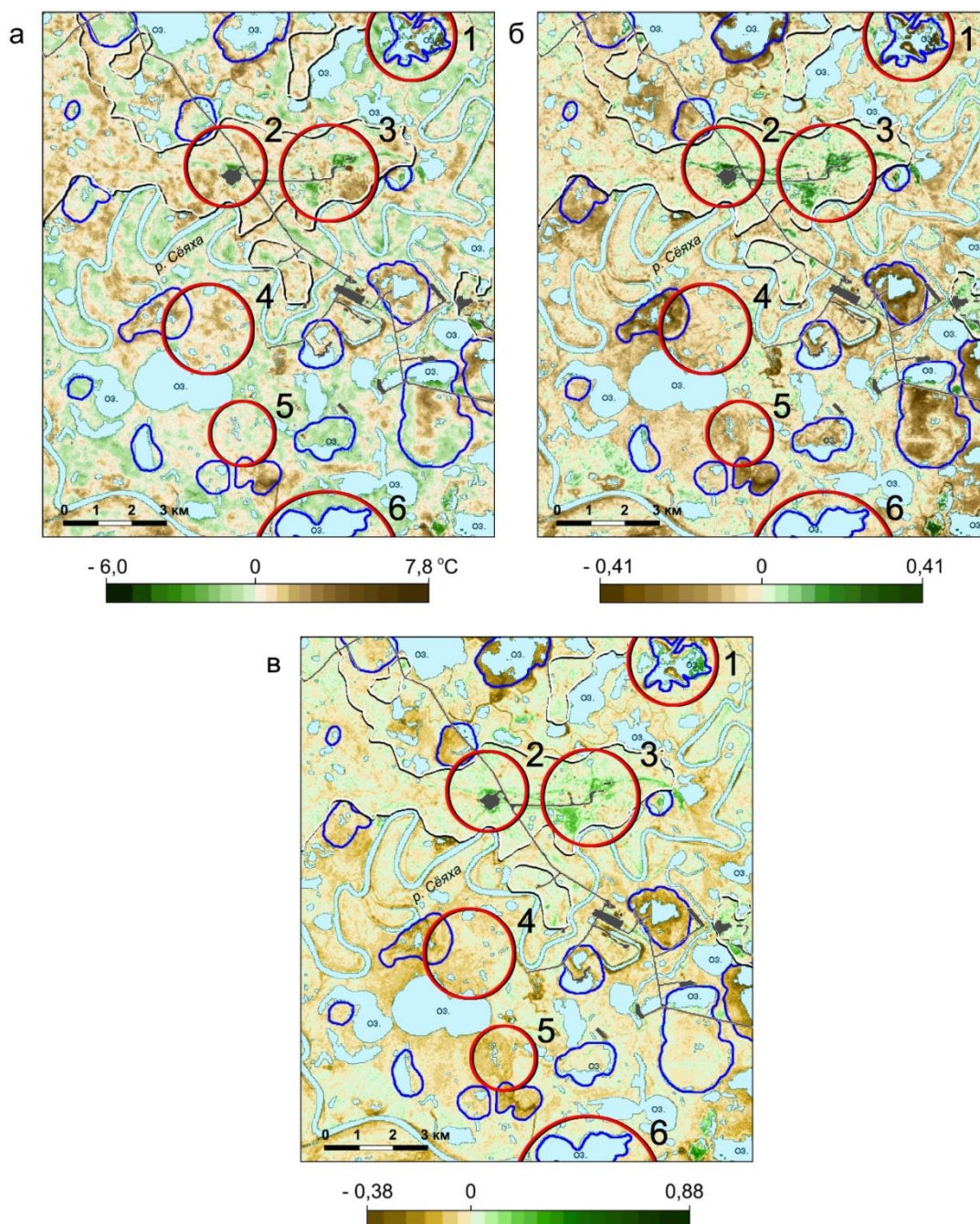


Рис. 3. Распределения разности значений:
а – LST, б – NDWI, в – NDVI по данным съемок 1990 и 1994 гг.

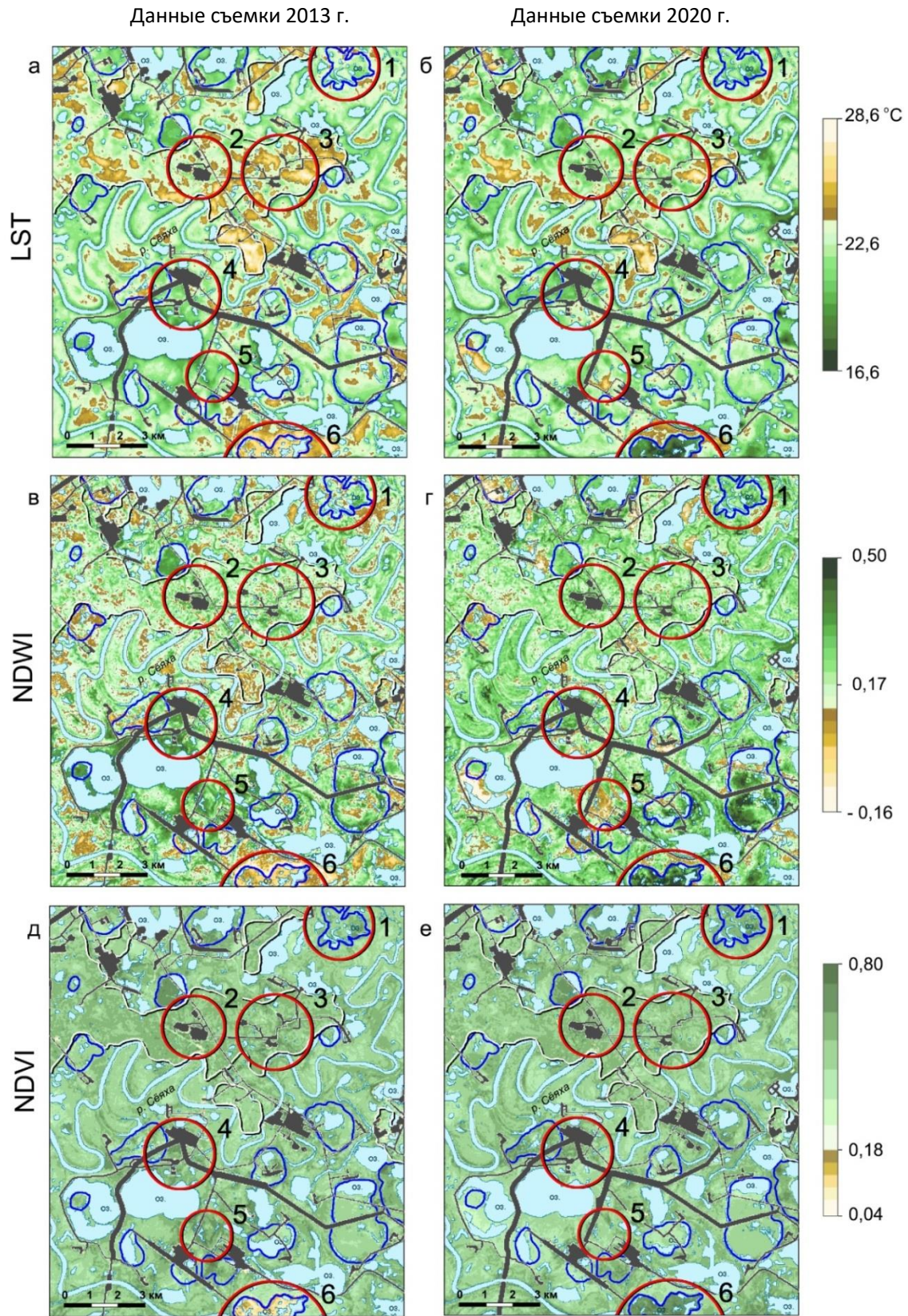


Рис. 4. Распределения значений: а, б – LST, в, г – NDWI, д, е – NDVI по данным съемок 2013 и 2020 гг.

На рис. 4 представлены изображения, характеризующие распределения параметров LST (а, б), NDWI (в, г) и NDVI (д, е) съемок 2013 и 2020 гг. На рис. 5 приведены распределения разности параметров LST (а),

NDWI (б) и NDVI (в), рассчитанные по данным съемок 1990 и 2020 гг. Границы водных поверхностей и технических объектов соответствуют их состоянию в 2020 г.

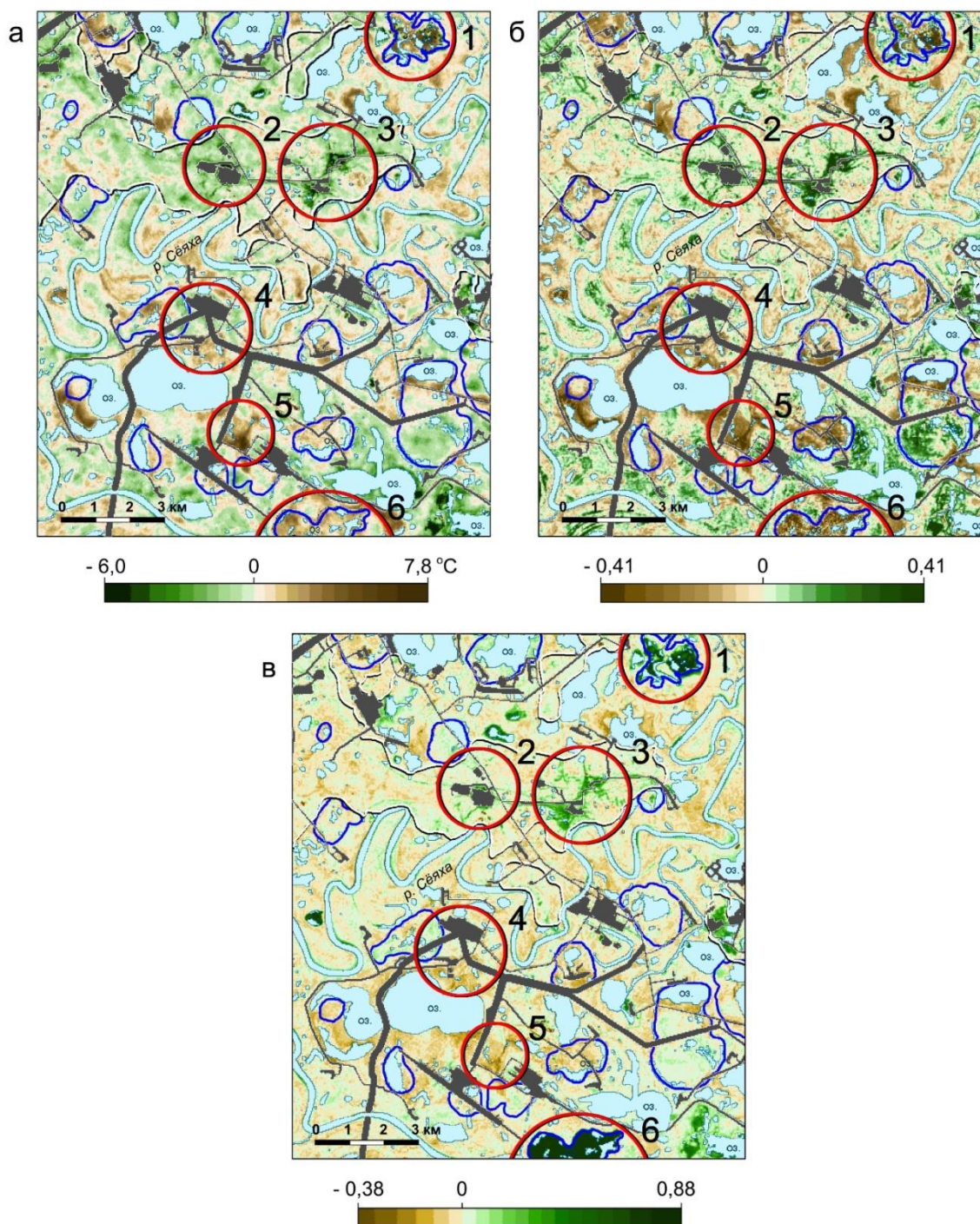


Рис. 5. Распределения разности значений: а – LST, б – NDWI, в – NDVI по данным съемок 1990 и 2020 гг.

Известно, что более дренированные участки водоразделов (морских террас), как правило, в полуденное время суток характеризуются более высокими значениями температуры поверхности по сравнению с примыкающими к ним более влажными поймами [10]. Идентичность распределений LST по данным съемок 1990 и 1994 гг. (см. рис. 2 а, б) подтверждает этот факт, свидетельствует об их неслучайном характере и очевидной связи с пространственной неоднородностью влажности поверхности. По данным съемки 1990 г. отмечается практически полное совпадение участков более высоких значений LST и низких значений NDWI (см. рис. 2 а, в), что характеризует относительно дренированные зоны, а также совпадение участков низких значений LST и высоких значений NDWI, относящихся к более влажным зонам. По данным съемки 1994 г. эта связь между распределениями LST и NDWI (см. рис. 2 б, г) не столь очевидна, в основном, из-за аномально низких значений NDWI в хасыреях, где не отмечаются более высокие значения LST. Снижение величины индекса NDWI здесь не случайно, поскольку одновременно отмечается в границах нескольких хасыреев. Приведенные примеры свидетельствуют о том, что параметр LST в сравнении с NDWI более информативен для характеристики пространственной неоднородности влажности покрова, поскольку LST зависит не только от влаги на поверхности, но и от влажности почвенно-растительного покрова в слое суточных колебаний температуры [19].

По распределениям разности параметров LST, NDWI и NDVI 1994 и 1990 гг. в границах участков 2 и 3 аномальных изменений (красные окружности на рис. 3) выделяются зоны снижения LST и

повышения NDWI, что указывает на увеличение влажности поверхности. В данном случае это связано с восстановлением растительного покрова (см. рис. 2 д, е), уничтоженного ранее разъездами транспорта [5], где фиксируется повышение значений NDVI (см. рис. 3 в). Аномальное снижение параметра NDWI в границах хасыреев сопровождается незначительным уменьшением индекса NDVI, что, скорее всего, связано с сокращением объемов живой зеленой фитомассы.

В 1994 г., отмечаются признаки спуска (осушения) озера на участке 1 (см. рис. 2 г, е). К 2013 г. произошло зарастание хасырея, на что указывают относительно низкие значения LST и высокие значения индексов NDWI, NDVI (см. рис. 4 а, в, д). Спуск озера на участке 6 произошел позже, ближе к 2013 г., поскольку в 2013 г. в границах хасырея еще отсутствует растительный покров (см. рис. 4 д). Аномально высокие значения LST и аномально низкие значения NDWI в границах этого хасырея в 2013 г. указывают на относительно низкую влажность и низкую эвапотранспирацию с поверхности обнаженных донных осадков (см. рис. 4 а, в). К 2020 г. дно хасырея на участке 6 покрывается растительностью с достаточно большим объемом зеленой массы, о чем свидетельствуют высокие значения индекса NDVI (см. рис. 4 е). Соответственно, в границах этого хасырея отмечаются аномально низкие значения LST (см. рис. 4 б) и аномально высокие значения NDWI (см. рис. 4 г), что объясняется более высокой влажностью вновь образованного напочвенного покрова. Как правило, зарастание хасыреев здесь происходит с формированием гигрофитных травяно-осоково-гипновых сообществ [2].

Разность распределений параметров съемок 1990 и 2020 гг. показывает, что после спада озер на участках 1 и 6 значение индекса NDVI повышается, поскольку для любого растительного покрова он всегда выше, чем для водной поверхности (см. рис. 5 в). Очевидно, что величина NDWI здесь будет аномально снижаться (см. рис. 5 б), так как вода имеет максимально возможные значения этого индекса. Величина параметра LST, наоборот, будет повышаться (см. рис. 5 а), поскольку в полуденное время суток температура любого природного компонента на суше всегда выше температуры поверхности водных объектов.

По распределениям LST съемок 2013 и 2020 гг. (см. рис. 4 а, б), также как и по распределениям 1990 и 1994 гг. (см. рис. 2 а, б), область водоразделов в среднем характеризуется более высокими значениями температуры поверхности по сравнению с

поймами. На участках 2 и 3 (см. рис. 5) за период с 1990 по 2020 гг. аномально высокое снижение величины LST вместе с ростом значений NDWI и NDVI также указывают на повышение влажности поверхности, что, как отмечалось выше, происходит в результате зарастания участков с полностью уничтоженной ранее растительностью. На рис. 6 а приведено RGB-синтезированное изображение фрагмента участка 3, сформированное по данным космической съемки сверхвысокого (субметрового) пространственного разрешения 27.06.2016 г. [20]. На снимке видно частично восстановленный растительный покров (зеленый тон) и большое количество сохранившихся следов от разездов транспорта. Данный факт подтверждает приведенные выше сведения об уничтожении здесь растительного покрова и последующем его восстановлении.



Рис. 6. Фрагменты участков: а – 3, б – 5, в – 4 по данным космической съемки сверхвысокого пространственного разрешения 27.06.2016 г. [20]

Приведенные примеры аномальных изменений LST, NDWI и NDVI на участках очевидных (типичных) трансформаций ландшафта могут служить доказательством возможности использования этих параметров для характеристики изменений на других

участках, не подвергавшихся явным нарушениям и изменениям. На таких участках изменения влажности поверхности могли произойти после строительства объектов, в частности, из-за изменений существовавших ранее условий поверхностного стока.

При визуальном сравнении распределений разности параметров за периоды 1990–1994 гг. (см. рис. 3) и 1990–2020 гг. (см. рис. 5) видно, что, за исключением состояния хасыреев в 1994 г., диапазон и интенсивность изменений (разброс) параметров за второй период значительно больше. Данный факт указывает на усиление разнонаправленных изменений биофизических характеристик поверхности после строительства объектов и дорог.

Сравнение расположений технических объектов в 2013 и 2020 гг. в исследуемом районе показывает, что их основная часть была построена к 2013 г. (см. рис. 4). В то же время последствия строительства объектов и дорог, в том числе связанные с изменением гидрологического режима, могли проявиться только через несколько лет. Наиболее отчетливо подобные изменения прослеживаются на участке 5 в районе пересечения дорог вблизи аэропорта (см. рис. 4 и 5). Принимая во внимание связь параметров LST и NDWI, в 2013 г. этот район можно было охарактеризовать как слабодренированный (см. рис. 4 а, в). По данным съемки 2020 г. влажность здесь значительно снизилась, поскольку значения LST стали существенно выше, а значения NDWI ниже (см. рис. 4 б, г). Соответственно, по распределениям разности параметров за период с 1990 по 2020 гг. здесь наблюдается аномальное повышение величины LST на 6–7 °С, а также аномальное снижение значений индексов NDWI и NDVI (см. рис. 5), что указывает на изменение состояния растительности (возможно ее угнетение) и существенное снижение влажности поверхности. По данным съемки высокого разрешения 2016 г. на участке 5 (см. рис. 6 б), в отличие от участка 3 (см. рис. 6 а), практически не отмечаются

следы нарушений растительного покрова. Отсюда следует, что наиболее вероятной причиной трансформации растительности на участке 5 стал процесс локального дренирования поверхности и сокращения объемов зеленой массы в результате изменения условий стока после строительства дорог.

Аналогичная ситуация наблюдается вблизи объектов в южной части участка 4 (см. рис. 4 и 5). Здесь также не обнаруживаются явные признаки каких-либо существенных нарушений поверхности (см. рис. 6 в), однако за период с 1990 по 2020 гг. значения параметра LST повысились приблизительно на 3 °С, а индексов NDWI и NDVI – существенно понизились, что указывает на преобладание процессов дренирования поверхности. Схожие, по изменениям параметров, участки с признаками процессов дренирования отмечаются также вблизи других технических объектов и дорог в пойменной части. В то же время выявляются участки снижения LST и роста индексов NDWI и NDVI (см. рис. 5), что характеризует процессы повышения влажности поверхности.

Заключение

Возможность использования инфракрасных тепловых космических снимков и различных спектральных индексов для мониторинга влажности поверхности хорошо известна. Исследования в этом направлении, в основном, проводились для средних широт, аридных, полуаридных областей, а также засушливых районов сельскохозяйственного назначения. Для районов арктических и субарктических тундр опыт проведения подобных работ незначителен.

В настоящем исследовании на основе изображений параметров LST, NDWI и NDVI, рассчитанных по данным спутников Landsat 5 и Landsat 8, для района интенсивной и длительной техногенной нагрузки Бованенковского НГКМ построены карты изменения влажности поверхности тундрового покрова за период с 1990 по 2020 гг. Основная отличительная особенность данного исследования состоит в применении разработанного ранее метода относительной радиометрической нормализации разновременных изображений параметров, что позволяет снизить погрешности и, соответственно, повысить чувствительность анализа изменений, а также устранить влияние климатических трендов. При таком подходе изменения параметров в районе расположения технических объектов преимущественно связаны с влиянием самих объектов и могут быть выявлены на ранних стадиях изменений влажности поверхности.

Оценка изменений влажности в данном случае носит качественный характер, и заключается в выделении участков аномальных изменений параметров LST и NDWI. Сопоставительный анализ параметров за разные годы съемки показал, что для характеристики и картографирования неоднородностей влажности тундрового покрова параметр LST более информативен по сравнению с индексом влажности NDWI. Однако из-за вероятности появления ложных тепловых аномалий, в частности, связанных с локальными метеорологическими условиями, для повышения достоверности оценки изменений влажности желательно проводить комплексный анализ обоих параметров.

В работе [3] по результатам анализа изменений индексов NDVI, NDWI и альbedo

поверхности сделан вывод о том, что в районе г.Надым прямое воздействие объектов инфраструктуры нефтегазового комплекса на природные ландшафты проявляется не далее чем на 100 м от источника возмущения. Анализ изменений параметров LST, NDWI и NDVI за период с 1990 по 2020 гг., проведенный в настоящем исследовании, указывает на то, что в районе южного свода Бованенковского НГКМ зона влияния объектов инфраструктуры может быть значительно больше (до 1 км). В основном, оно выражается в изменении влажности поверхности и, как следствие, в изменении состояния растительного покрова. В пойме, занимающей наибольшую часть исследуемого района, вблизи объектов преобладают процессы дренирования поверхности и снижения объема живой фитомассы в напочвенном покрове. Наблюдаемое перераспределение влаги с образованием новых дренированных и переувлажненных участков, в основном, связано со строительством объектов и дорог, поскольку любая искусственная дренажная система не может в полной мере соответствовать существовавшим ранее условиям поверхностного стока. В данном случае, преобладание участков дренирования вблизи объектов может быть более безопасно по сравнению с переувлажнением и подтоплением. Примером подобной сложной ситуации считается известное затопление части хасырея северо-западнее участка 2 вблизи дороги после ее строительства в начале 90-х годов (см. рис. 2). Степень опасности для технических объектов наблюдаемых процессов активного дренирования может быть определена с учетом особенностей гидрологических и геокриологических условий участков.

Подобное техногенное воздействие на криогенные ландшафты на фоне климатического повышения температуры воздуха может быть дополнительным фактором роста эмиссии углеродосодержащих газов, поскольку повышение температуры поверхности и снижение влажности напочвенного покрова, как правило, ведут к деградации мерзлоты и увеличению глубины талого слоя [21].

В целом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения разновременных нормализованных изображений параметров LST, NDWI и NDVI, рассчитанных по данным спутников Landsat, для мониторинга влажности тундрового покрова в районах расположения промышленных и инфраструктурных объектов в криолитозоне.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли», № АААА-А19-119021590079-6).

Литература

1. Лавриненко И.А. Карта техногенной нарушенности растительного покрова Ненецкого автономного округа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 2. С. 128–136. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-128-136>
2. Московченко Д.В. Особенности многолетней динамики растительности Бованенковского месторождения (полуостров Ямал) // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2013. № 12. С. 57–66.
3. Yu Q., Epstein H.E., Engstrom R., Shiklomanov N., Streletskiy D. Land cover and land use changes in the oil and gas regions of Northwestern Siberia under changing climatic conditions // Environmental Research Letters. 2015. Vol. 10, No. 12. P. 124020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124020>
4. Пендин В.В., Ганова С.Д. Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне. М.: ОАО «ПНИИИС», 2009. 236 с.
5. Kumpula T., Forbes B.C., Stammler F., Meschtyb N. Dynamics of a coupled system: multi-resolution remote sensing in assessing social-ecological responses during 25 years of gas field development in Arctic Russia // Remote Sensing. 2012. Vol. 4, No. 4. P. 1046–1068. <https://doi.org/10.3390/rs4041046>
6. Матвеева А.А., Рыбачук А.В. Оценка уровня воздействия Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения на природно-территориальный комплекс // Московский экономический журнал. 2020. № 12. С. 356–368. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2020-10848>
7. Соломатин В.И., Коняхин М.А. Прогноз геоэкологических изменений территории месторождения «Бованенково» (п-ов Ямал) // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446, № 2. С. 209–211.
8. Ardelean F., Onaca A., Chetan M-A. et al. Assessment of spatio-temporal landscape changes from VHR images in three different permafrost areas in the Western Russian Arctic // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, No. 23. P. 3999. <https://doi.org/10.3390/rs12233999>

9. *Корниенко С.Г.* Выявление изменений влажности тундрового почвенно-растительного покрова по данным мультиспектральной космической съемки (на примере территории строительства завода по сжижению природного газа на полуострове Ямал) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 5. С. 110–119. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-110-119>
10. *Корниенко С.Г.* Использование тепловых снимков со спутника Landsat 7 при картографировании тундровых ландшафтов на примере участка газопровода «Бованенково–Байдарацкая Губа» // *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2020. Вып. 3(30). С. 51–63. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-30.art6>
11. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. В 3 т. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под ред. Ю.Б. Бадю, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: ООО «Газпром ЭКСПО», 2013. 423 с.
12. *Морозова Л.М., Магомедова М.А.* Структура растительного покрова и растительные ресурсы полуострова Ямал. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2004. 63 с.
13. *Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 89, No. 4. P. 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
14. *Gao B.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58, No. 3. P. 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
15. *Nill L., Ullmann T., Kneisel C.* et al. Assessing spatiotemporal variations of Landsat land surface temperature and multispectral indices in the Arctic Mackenzie Delta Region between 1985 and 2018 // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 19. P. 2329. <https://doi.org/10.3390/rs11192329>
16. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
17. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, No. 14. P. 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
18. *Kornienko S.G.* Radiometric normalization of Landsat thermal imagery for detection of tundra land cover changes: experience from West Siberia // *International Journal of Remote Sensing*. 2021. Vol. 42, No. 4. P. 1420–1449. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1832280>
19. *Schildge J.P., Kahle A.B., Alley R.E., Gillespie A.R.* Use of thermal inertia properties for material identification // *SPIE Image Processing for Missile Guidance*. 1980. Vol. 238. P. 350–357. <https://doi.org/10.1117/12.959165>
20. Google Earth. <https://earth.google.com/web/@70.37333064,68.39115577,22.9743947a,27728.60591678d,35y,0h,0t,0r> (Дата обращения 12.11.2021).
21. *O'Donnell J.A., Romanovsky V.E., Harden J.W., McGuire A.D.* The effect of moisture content on the thermal conductivity of moss and organic soil horizons from black spruce ecosystems in interior Alaska // *Soil Science*. 2009. Vol. 174, No. 12. P. 646–651. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181c4a7f8>

Characteristics of changes in the moisture content of the tundra cover in the area of the Bovanenkovo field using Landsat satellite data

S.G. Kornienko

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Abstract. By the case of the area of a long-term technogenic load of the Bovanenkovo oil and gas condensate field, the possibility of monitoring the moisture content of the tundra cover near technical objects according to the Landsat 5 and Landsat 8 satellites is shown. The work used multispectral images from 1990, 1994, 2013 and 2020. The analysis was carried out on images characterizing the Earth's surface temperature, surface moisture (NDWI index) and chlorophyll content in the canopy (NDVI index). Characterization and mapping of changes in the moisture content of the cover were carried out according to the difference between the images of 1990 and 2020. Variations in the NDVI index allow us to identify the reasons for these changes. The technogenic impact is shown to lead to an increase in the surface temperature and a decrease in the NDWI and NDVI values, which indicates the predominance of drainage processes and a decrease in the volume of living phytomass near technical objects. Such transformations are less dangerous for objects in comparison with waterlogging of the cover, however, they contribute to an increase in the emission of carbon-containing gases, since an increase in temperature and a decrease in surface moisture, as a rule, lead to degradation of the permafrost and an increase in the depth of the thawed layer.

Keywords: monitoring, surface moisture, Landsat satellites, temperature, NDWI index, NDVI index, tundra cover, technical objects, Bovanenkovo field.

Citation: Kornienko S.G. Characteristics of changes in the moisture content of the tundra cover in the area of the Bovanenkovo field using Landsat satellite data // Actual Problems of Oil and Gas. 2021. Iss. 4(35). P. 30–48. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-35.art4> (In Russ.).

References

1. *Lavrinenko I.A.* Map of technogenic disturbance of Nenets Autonomous District // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018. Vol. 15, No. 2. P. 128–136. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-128-136> (In Russ.).
2. *Moskovchenko D.V.* Peculiarities of long-term dynamics of vegetation at the Bovanenkovskoye field (Yamal Peninsula) // *Herald of Tyumen State University*. 2013. No. 12. P. 57–66. (In Russ.).
3. *Yu Q., Epstein H.E., Engstrom R., Shiklomanov N., Strelestskiy D.* Land cover and land use changes in the oil and gas regions of Northwestern Siberia under changing climatic conditions // *Environmental Research Letters*. 2015. Vol. 10, No. 12. P. 124020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124020>
4. *Pendin V.V., Ganova S.D.* Geocological monitoring of the territories where gas transportation facilities are located in the permafrost zone. Moscow: PNIIS OJSC, 2009. 236 p. (In Russ.).
5. *Kumpula T., Forbes B.C., Stammler F., Meschtyb N.* Dynamics of a coupled system: multi-resolution remote sensing in assessing social-ecological responses during 25 years of gas field

development in Arctic Russia // *Remote Sensing*. 2012. Vol. 4, No. 4. P. 1046–1068. <https://doi.org/10.3390/rs4041046>

6. *Matveeva A.A., Rybachuk A.V.* Estimation of the impact level of the Bovanenkovsky oil and gas condensate field to the natural territorial complex // *Moscow Economic Journal*. 2020. No. 12. P. 356–368. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2020-10848> (In Russ.).

7. *Solomatina V.I., Konyakhin M.A.* Forecast of geocological changes of the Bovanenkovo field (Yamal Peninsula) // *Doklady Earth Sciences*. 2012. Vol. 446, No. 1. P. 1110–1111. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12090139>

8. *Ardelean F., Onaca A., Chetan M-A.* et al. Assessment of spatio-temporal landscape changes from VHR images in three different permafrost areas in the Western Russian Arctic // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 23. P. 3999. <https://doi.org/10.3390/rs12233999>

9. *Kornienko S.G.* Water content variations in the tundra land cover: evidence from multispectral satellite imagery (a case study of a liquefied natural gas plant construction site, Yamal Peninsula) // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018. Vol. 15, No. 5. P. 110–119. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-110-119> (In Russ.).

10. *Kornienko S.G.* Using thermal images from the Landsat 7 satellite for mapping tundra landscapes: the case of the Bovanenkovo – Baydaratskaya Bay gas pipeline section // *Actual Problems of Oil and Gas*. 2020. Iss. 3(30). P. 51–63. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-30.art6> (In Russ.).

11. Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula. In 3 volumes. Vol. 2. Cryosphere of the Bovanenkovo oil and gas condensate field / Ed. by Yu. Badu, N.A. Gafarov, E.E. Podborny. Moscow: Gazprom EXPO LLC, 2013. 423 p. (In Russ.).

12. *Morozova L.M., Magomedova M.A.* Land cover structure and plant resources of the Yamal Peninsula. Yekaterinburg: Ural University, 2004. 63 p. (In Russ.).

13. *Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 89, No. 4. P. 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>

14. *Gao B.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58, No. 3. P. 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

15. *Nill L., Ullmann T., Kneisel C.* et al. Assessing spatiotemporal variations of Landsat land surface temperature and multispectral indices in the Arctic Mackenzie Delta Region between 1985 and 2018 // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 19. P. 2329. <https://doi.org/10.3390/rs11192329>

16. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

17. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, No. 14. P. 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

18. *Kornienko S.G.* Radiometric normalization of Landsat thermal imagery for detection of tundra land cover changes: experience from West Siberia // *International Journal of Remote Sensing*. 2021. Vol. 42, No. 4. P. 1420–1449. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1832280>

19. *Schildge J.P., Kahle A.B., Alley R.E., Gillespie A.R.* Use of thermal inertia properties for material identification // *SPIE Image Processing for Missile Guidance*. 1980. Vol. 238. P. 350–357. <https://doi.org/10.1117/12.959165>

20. Google Earth. <https://earth.google.com/web/@70.37333064,68.39115577,22.9743947a,27728.60591678d,35y,0h,0t,0r> (Accessed on 12.11.2021).

21. *O'Donnell J.A., Romanovsky V.E., Harden J.W., McGuire A.D.* The effect of moisture content on the thermal conductivity of moss and organic soil horizons from black spruce ecosystems in interior Alaska // *Soil Science*. 2009. Vol. 174, No. 12. P. 646–651. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181c4a7f8>