

Характеристика антропогенных трансформаций напочвенного покрова в районе Ямбургского месторождения по данным спутников Landsat

С. Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, 119333, Россия
E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Приведены результаты изучения антропогенных трансформаций напочвенного растительного покрова в районах строительства и функционирования объектов Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения на Тазовском п-ове. Исследование проводилось с использованием 10 летних снимков со спутников Landsat-5, -7, -8 за период с 1988 по 2019 г. на основе параметров, характеризующих температуру поверхности (*англ.* Land Surface Temperature — LST), альbedo (Alb), содержание хлорофилла (NDVI, *англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) и влажность (NDWI, *англ.* Normalized Difference Water Index — нормализованный разностный водный индекс) напочвенного покрова. Характеристика многолетних трендов и локальных изменений параметров проводилась с применением методики относительной радиометрической нормализации изображений, позволяющей повысить чувствительность мультитременного анализа данных за счёт снижения влияния факторов, не связанных с антропогенным воздействием. В районе более длительной разработки (с 1984 г.) выявлены доминирующие тенденции повышения средних значений параметров NDVI, Alb и NDWI, что указывает на увеличение объёмов зелёной фитомассы в процессе восстановления растительности после нарушения её состояния при строительстве и обслуживании технических объектов. Отсутствие значимых трендов изменения средних значений параметра LST в целом по району объясняется паритетом процессов локального понижения и повышения температуры поверхности, обусловленных различной реакцией ландшафтов на антропогенное воздействие. Отсутствие значимых трендов изменения NDVI и NDWI в районе более позднего освоения указывает на относительную стабильность состояния растительного покрова, что может быть свидетельством применения более рациональных и экологически безопасных подходов при строительстве объектов и обустройстве месторождения. Данные выводы подтверждаются фрагментами детальных карт, характеризующих изменение параметров за 31 г. Выявленные на фоне климатического тренда тенденции увеличения объёмов зелёной фитомассы, связанные с антропогенным воздействием, могут быть следствием формирования локального микроклимата, что в совокупности с глобальным потеплением может привести к усилению процессов деградации мерзлоты и росту эмиссии биогенных газов.

Ключевые слова: альbedo, антропогенное воздействие, дистанционное зондирование, криогенные ландшафты, напочвенный растительный покров, температура, трансформации, тренды, тундра, Ямбургское месторождение, NDVI, NDWI

Одобрена к печати: 28.03.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-184-201

Введение

На фоне глобального потепления антропогенное воздействие на криогенные ландшафты, связанное с разработкой месторождений углеводородов, становится дополнительным фактором дестабилизации геокриологических условий. Риски развития опасных геокриологических процессов (ОГП) могут повышаться из-за микроклиматических изменений, связанных с влиянием технических объектов. Триггерами возникновения таких локальных ОГП, как термокарст (*рис. 1*, см. с. 185), термоэрозия, морозное пучение, подтопление, заболачивание и др., в основном являются уничтожение напочвенного растительного покрова и нарушение условий поверхностного стока.

Степень, характер и масштабы антропогенных нарушений могут быть разными, с различной вероятностью активизации ОГП. В этой связи актуальны исследования, характери-

зующие интенсивность и вероятные последствия антропогенного воздействия на тундровые ландшафты. В настоящее время оценка подобных изменений может проводиться на основе ретроспективного анализа данных дистанционного зондирования Земли (Лавриненко, 2018; Ardelean et al., 2020; Yu et al., 2015). Обобщение опыта применения данных космической съёмки на месторождениях позволит выявить типичные признаки изменения биофизических свойств поверхности, связанные с трансформацией ландшафтов, сравнить характер и масштабы нарушений, прогнозировать вероятные последствия, а также оценить эффективность проводимых мероприятий по обеспечению рационального и экологически безопасного освоения месторождений.



Рис. 1. Развитие термокарстового провала вблизи дороги на Ямбургском НГКМ (фото автора, 17 июня 2014 г.)

Цель настоящего исследования — на основе данных съёмки со спутников Landsat охарактеризовать доминирующие тенденции и типичные локальные трансформации напочвенного растительного покрова в районе Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), обусловленные антропогенным воздействием.

Район исследований

Ямбургское НГКМ, освоение которого ведёт ООО «Газпром добыча Ямбург», расположено в центральной части Тазовского п-ова (рис. 2а, см. с. 186). Развёрнутое строительство на месторождении было начато в 1984 г. Территория исследований относится к подзоне субарктических южных тундр со сплошным распространением многолетнемёрзлых пород. Рельеф территории месторождения с перепадами высотных отметок от 9 до 43 м представлен Зырянской и Казанцевской морскими равнинами, а также эрозионно-аккумулятивными поверхностями пойм рек и надпойменных террас (Павлунин и др., 2015). В напочвенном покрове доминирует низкорослая (2–20 см) мохово-лишайниково-кустарничковая растительность и кустарники. На территории исследований (рис. 2б) размером 50×50 км были определены районы более ранней (А) и более поздней (Б) разработки, в границах которых по данным космической съёмки оценивались многолетние тренды изменения параметров, характеризующих

биофизические свойства напочвенного покрова. Дополнительно анализировались территории в границах морской (III) и надпойменной (II) террас района А. Районы В и Г размером 4,3×4,7 км приведены в качестве примеров детального картографирования типичных локальных трансформаций растительного покрова (РП). Территория за границами районов А и Б рассматривалась как фоновая (ненарушенная), относительно которой проводилась оценка изменений напочвенного покрова в районах А–Г.

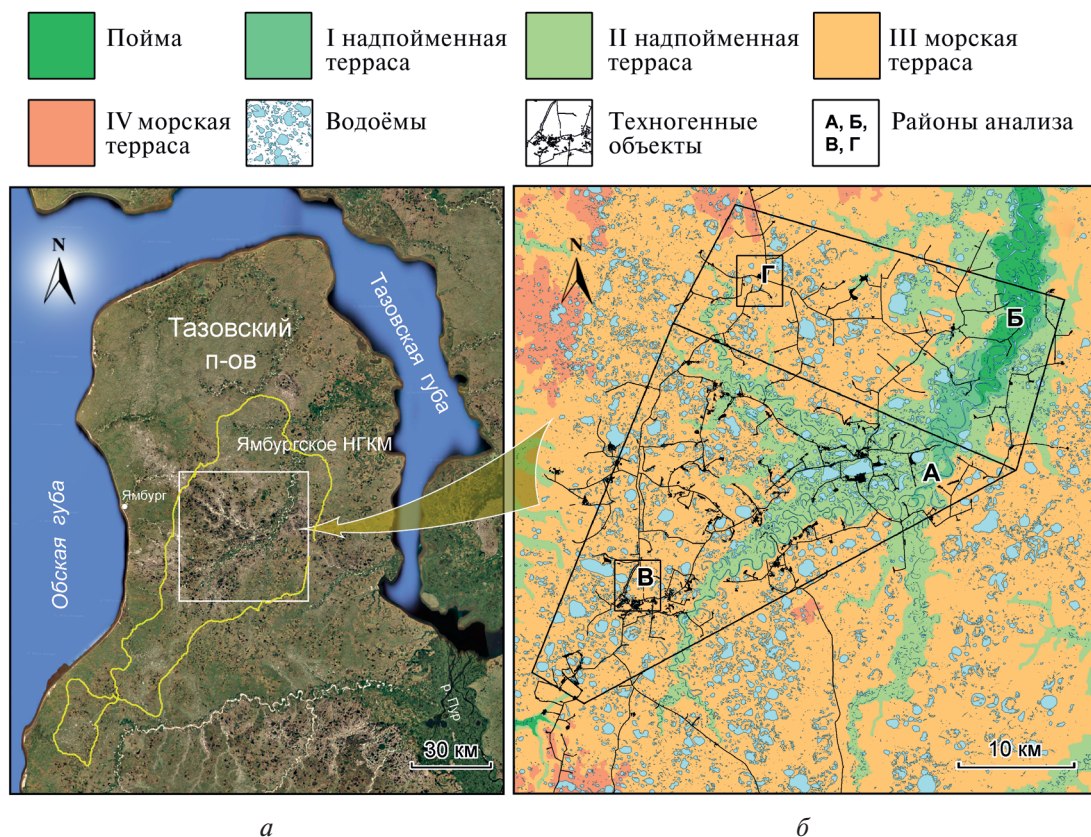


Рис. 2. Карты-схемы расположения Ямбургского НГКМ, территории исследований на Тазовском п-ове (а) и районов А–Г анализа изменений напочвенного покрова (б)

Материалы и методика исследований

Для оценки изменения состояния напочвенного покрова, связанного с техногенной нагрузкой, наиболее приемлемы данные со спутников Landsat. Характеристика трансформаций покрова в районе Ямбургского НГКМ проводилась на основе 10 снимков со спутников Landsat-5, -7, -8 (табл. 1) уровня обработки L1, находящихся в свободном доступе (<https://glovis.usgs.gov/app>).

Преимущество снимков Landsat состоит в совместимости спектральных каналов и соизмеримости пространственного разрешения данных, разнесённых по времени, что позволяет более достоверно характеризовать изменения состояния поверхности. Предварительная обработка снимков включала калибровку спектральных каналов и формирование фрагментов на исследуемую территорию.

Характеристика изменения напочвенного покрова проводилась по значениям температуры (англ. Land Surface Temperature — LST) (Weng et al., 2004) и альбедо (Alb) (Liang, 2000) поверхности, нормализованного индекса влажности поверхности (англ. Normalized Difference Water Index — NDWI) (Gao, 1996) и нормализованного вегетационного индекса (англ. Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) (Tucker, 1979). Параметр LST информативен

в основном для характеристики содержания суммарной влажности почвенно-растительного покрова в слое суточных колебаний температуры (СКТ), который составляет первые десятки сантиметров (Schieldge et al., 1980). Значения параметра LST приведены в градусах Цельсия. Альbedo (Alb) в комбинации с LST позволяет судить об интенсивности испарения с поверхности и/или поглощения радиации (Jacob et al., 2002). Индекс NDVI зависит от объёма живой зелёной массы (содержания хлорофилла) в напочвенном покрове. Повышение значений NDVI, Alb и NDWI может свидетельствовать о развитии растительных сообществ по мере восстановления нарушенных ландшафтов.

Таблица 1. Используемые в работе снимки спутников Landsat

Дата съёмки	Спутник	Местное время съёмки	Кадр (Path; Row)
06.07.1988	Landsat-5	10:58	159;12
19.07.1990		10:54	160;12
07.07.1994		10:46	159; 12
01.07.1995		10:39	160; 12
07.08.2000	Landsat-7	11:25	160; 12
15.07.2006	Landsat-5	11:27	160; 12
18.07.2013	Landsat-8	11:36	160; 12
02.08.2015		11:27	159; 12
06.07.2017		11:27	159; 12
19.07.2019		11:34	160; 12

Для снижения радиометрических искажений, обусловленных различиями метеорологических условий, пропускания атмосферы, времени, углов съёмки и калибровочных характеристик съёмочных систем, использовалась методика относительной радиометрической нормализации изображений (ОРНИ) по каждому параметру, когда изображения всего временного ряда преобразуются к виду одного опорного изображения (Canty, Nielsen, 2008; Rahman et al., 2015; Yan, 2021). Применяемая в настоящем исследовании методика ОРНИ подробно описана в работе (Корниенко, 2022). Нормализация осуществлялась по районам ненарушенного (фонового) состояния, по так называемым псевдо-инвариантным областям (ПИО), которые определяются по признаку стабильности спектральных характеристик элементов ландшафта (Canty, Nielsen, 2008). При таком подходе вариации параметров в районах техногенной нагрузки будут характеризовать трансформации покрова, обусловленные в основном антропогенным воздействием, поскольку другие факторы влияния, в том числе климатические и сезонные изменения, будут устраняться вместе с радиометрическими искажениями. В качестве опорных изображений использовались снимки со спутника Landsat-5 съёмки 1995 г. После нормализации шкалы параметров нормализованных изображений соответствуют шкалам опорных изображений. В данном случае основное преимущество применения методов ОРНИ состоит в повышении чувствительности мультитременного анализа данных за счёт снижения влияния факторов, не связанных с антропогенным воздействием.

При анализе изменений по каждому пикселю изображений погрешность σ нормализации, представленная в виде среднеквадратического отклонения (СКО), вычисляется по формуле (Rahman et al., 2015; Yan, 2021):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_o^{\text{ПИО}} - P_n^{\text{ПИО}})^2}{N}}, \quad (1)$$

где $P_o^{\text{ПИО}}$ и $P_n^{\text{ПИО}}$ — соответственно значения любого из параметров опорного и нормализованного изображений по каждому пикселю в границах ПИО; N — число значений. В табл. 2

приведены значения СКО (σ) по каждому параметру за каждый год с исключением 1995 г., относительно которого проводилась нормализация изображений.

При оценке доминирующих тенденций изменения состояния поверхности, как правило, анализируются средние значения (\bar{P}) параметров на больших участках с числом пикселей от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч. В данном случае символом \bar{P} обозначается среднее значение любого из параметров — LST, NDVI, Alb и NDWI.

Таблица 2. Значения среднеквадратических отклонений (σ), характеризующие погрешности нормализации изображений

Год съёмки	LST, °C	NDVI	Alb	NDWI
1988	0,82	0,026	0,014	0,035
1990	0,75	0,020	0,011	0,030
1994	0,92	0,037	0,016	0,042
2000	0,84	0,025	0,016	0,035
2006	0,98	0,051	0,019	0,054
2013	0,73	0,038	0,015	0,031
2015	0,96	0,048	0,017	0,040
2017	0,74	0,041	0,017	0,038
2019	0,84	0,043	0,014	0,033
Средние	0,84	0,037	0,014	0,038

Рассчитываемые по средним значениям параметров доминирующие тенденции (тренды) на больших участках (с большим числом пикселей) могут характеризоваться незначительными изменениями, соизмеримыми с минимальными контрастами (МК) самих изображений. Известно, что пространственное усреднение позволяет снизить погрешность, связанную с изменениями случайного характера. В этой связи актуален вопрос о зависимости величины погрешностей нормализации от объёмов выборки (количества пикселей), по которым рассчитываются средние значения параметров опорного и нормализованного изображений. Абсолютная погрешность нормализации θ может быть представлена в виде модуля разности средних значений параметра опорного $\bar{P}_0^{\text{ПИО}}$ и нормализованного $\bar{P}_n^{\text{ПИО}}$ изображений для выборок с числом пикселей N :

$$\theta = \left| \bar{P}_0^{\text{ПИО}}(N) - \bar{P}_n^{\text{ПИО}}(N) \right|. \quad (2)$$

Расчёт погрешности θ проводится по участкам (выборкам) с разным количеством пикселей в границах ПИО. В качестве примера на *рис. 3* (см. с. 189) приведены графики, характеризующие изменение погрешности θ в зависимости от количества пикселей N в выборках по фоновой области Ямбургского НГКМ на основе снимков Landsat-5 в 1995 г. (опорные изображения) и Landsat-8 за 2019 г. (нормализованные изображения). Горизонтальные линии на графиках соответствуют уровням минимальных контрастов изображений по параметрам (Корниенко, 2022). На графиках (см. *рис. 3*) максимальные значения погрешности соответствуют $N = 1$, т. е. одному пикселю изображений. Из графиков видно, что для LST и Alb максимальная погрешность θ ниже МК при $N > 20\,000$, а для NDWI и NDVI при $N > 40\,000$. Отсюда следует, что при объёме выборки $N > 40\,000$ могут анализироваться изменения параметров, соизмеримые с МК изображений. Для нормализованных изображений других дат съёмки отмечаются аналогичные зависимости, также указывающие на порог $N > 40\,000$.

Данное исследование преследовало цель выявления изменения состояния почвенного растительного покрова, находящегося вблизи техногенных объектов и между ними, поэтому все построенные объекты, включая дороги, карьеры и открытые грунты, а также природные поверхности без растительности, в том числе речные отмели и песчаные раздувы, за все годы

вместе объединялись в единую маску и исключались из анализа. Маскирование этих объектов проводилось по пороговому значению индекса $NDVI < 0,18$, ниже которого поверхности были отнесены к участкам без РП. В настоящей работе порог $NDVI < 0,18$ был установлен на основе анализа распределения этого параметра в границах технических объектов, карьеров и речных отмелей, однозначно дешифрируемых по данным Landsat каждого года съёмки. Полученное значение порога достаточно близко к значениям, показанным в работах (Nelson et al., 2022; Nill et al., 2022). Очевидно, что к «нарушенным» также могут быть отнесены участки с $NDVI > 0,18$, на которых произошли значимые изменения состояния поверхности, в том числе связанные с изменением доли открытых грунтов в пикселе изображений.

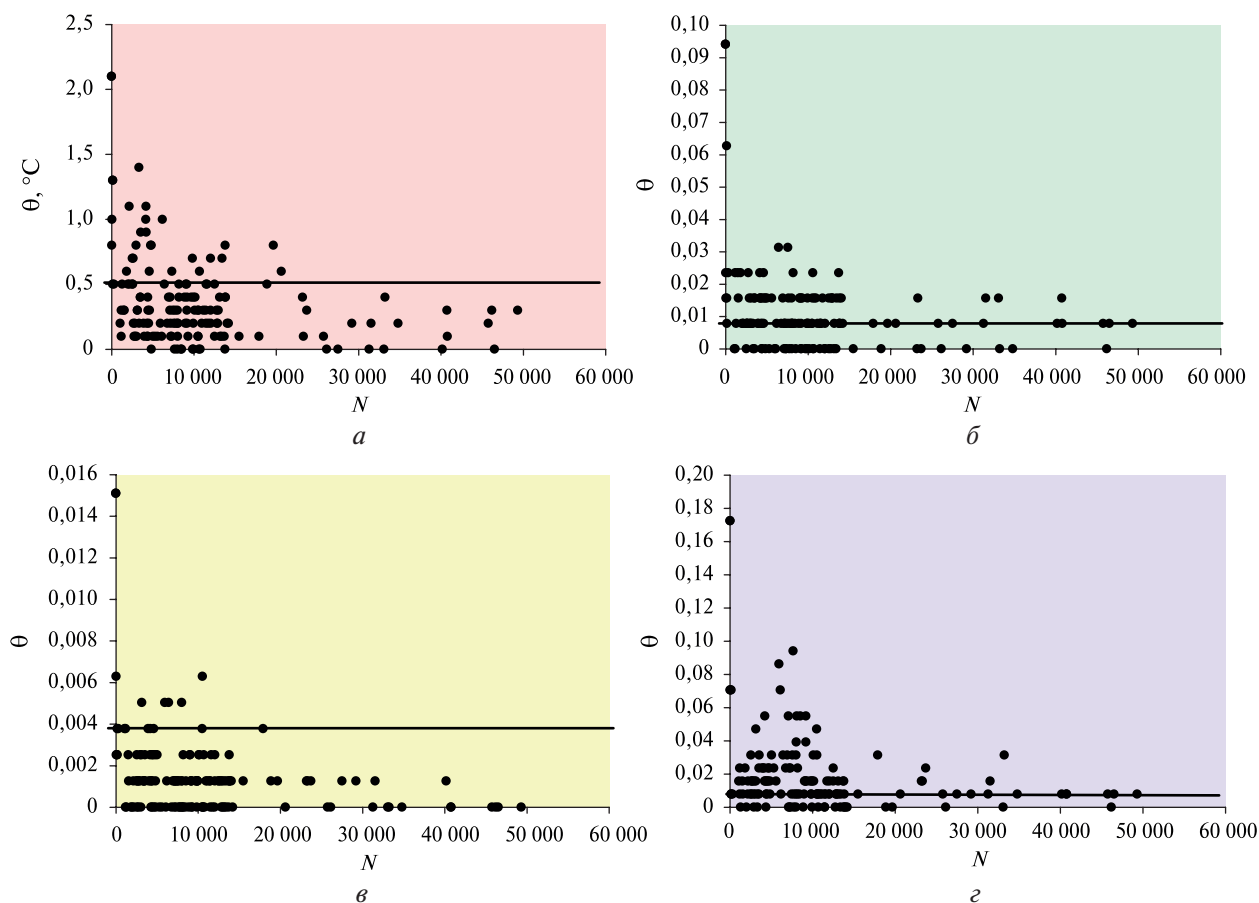


Рис. 3. Изменение абсолютной погрешности нормализации θ в зависимости от количества значений (пикселей) N для параметров LST (а), NDVI (б), Alb (в) и NDWI (г); чёрная линия — уровень минимальных контрастов

Все водные поверхности, выявленные по каждому году наблюдений, также маскировались, объединялись и исключались из анализа. Выделение водных поверхностей проводилось по пороговому значению индекса $MNDWI < 0$ (англ. Modified Normalized Difference Water Index, модифицированный нормализованный разностный водный индекс), ниже которого поверхности относят к воде (Ху, 2006).

После маскирования техногенных объектов, песков и водных поверхностей количество пикселей по фоновой области в целом составило $N = 1\,442\,586$, для анализируемой части района А в целом $N = 554\,033$, для района Б в целом $N = 471\,068$, для III морской террасы района А $N = 313\,994$, а для II надпойменной террасы района А количество пикселей $N = 106\,561$. Поскольку количество пикселей N для всех анализируемых районов существенно больше пороговых значений ($N > 40\,000$), то при оценке средних значений параметров по этим районам максимальные погрешности θ не будут превышать величин минимальных контрастов

(см. рис. 3). В настоящем исследовании оценка значимости трендов проводилась с использованием непараметрического теста Манна–Кендалла (Mann, 1945) с уровнями порога значимости $\alpha = 0,05$ и $\alpha = 0,1$. Все расчёты средних значений параметров и погрешностей нормализации определялись при 99%-м доверительном интервале распределения параметров. Обработка и анализ данных космической съёмки проводились с использованием программного комплекса ENVI 5.3 и программы MS Excel 2010.

Результаты и их обсуждение

На рис. 4 приведены графики изменения средних значений параметров исходных, ненормализованных изображений по фоновой области, а также по районам техногенной нагрузки А и Б. Межгодовые вариации параметра LST (см. рис. 4а) по всем трём районам (фон, А, Б) практически ничем не различаются и в основном обусловлены различиями температуры воздуха у земной поверхности на момент съёмки. Изменения параметров NDVI, Alb и NDWI указывают на тенденцию повышения значений. Поскольку кривые на рис. 4 построены по ненормализованным изображениям, то очевидно, что наблюдаемые синхронные межгодовые колебания параметров связаны с влиянием перечисленных выше радиометрических искажений, а также с возможными сезонными различиями состояния РП. Интерпретация подобных кривых (см. рис. 4), как правило, неоднозначна. Видимое повышение NDVI, Alb и NDWI может быть обусловлено климатическим трендом потепления (Тишков и др., 2018), однако есть основания полагать, что это связано с инструментальными ошибками, в частности из-за различий спектральных каналов спутников Landsat-5, -7 и Landsat-8 (Елсаков, 2021; Roy et al., 2016).

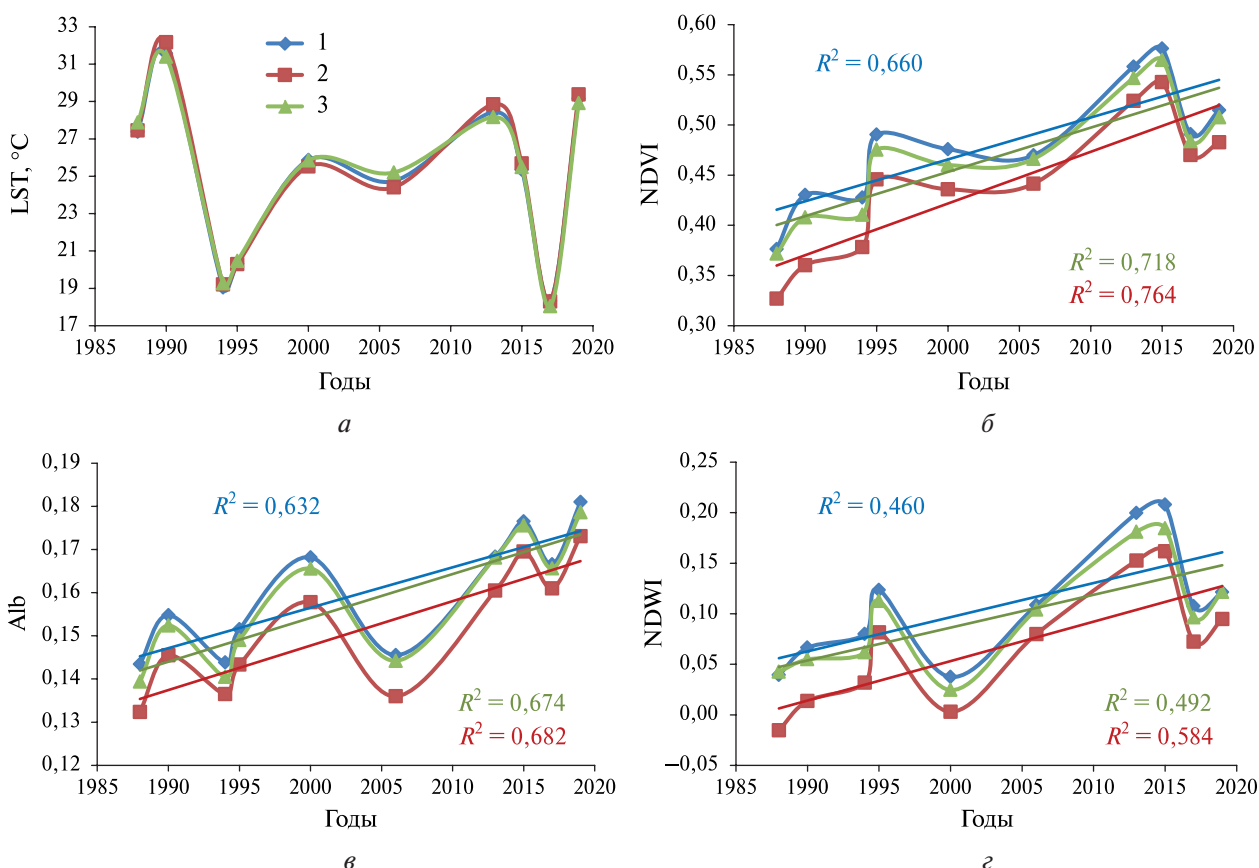


Рис. 4. Многолетние вариации средних значений параметров ненормализованных изображений LST (а), NDVI (б), Alb (в) и NDWI (з). 1 — фоновая область; 2 — район А; 3 — район Б

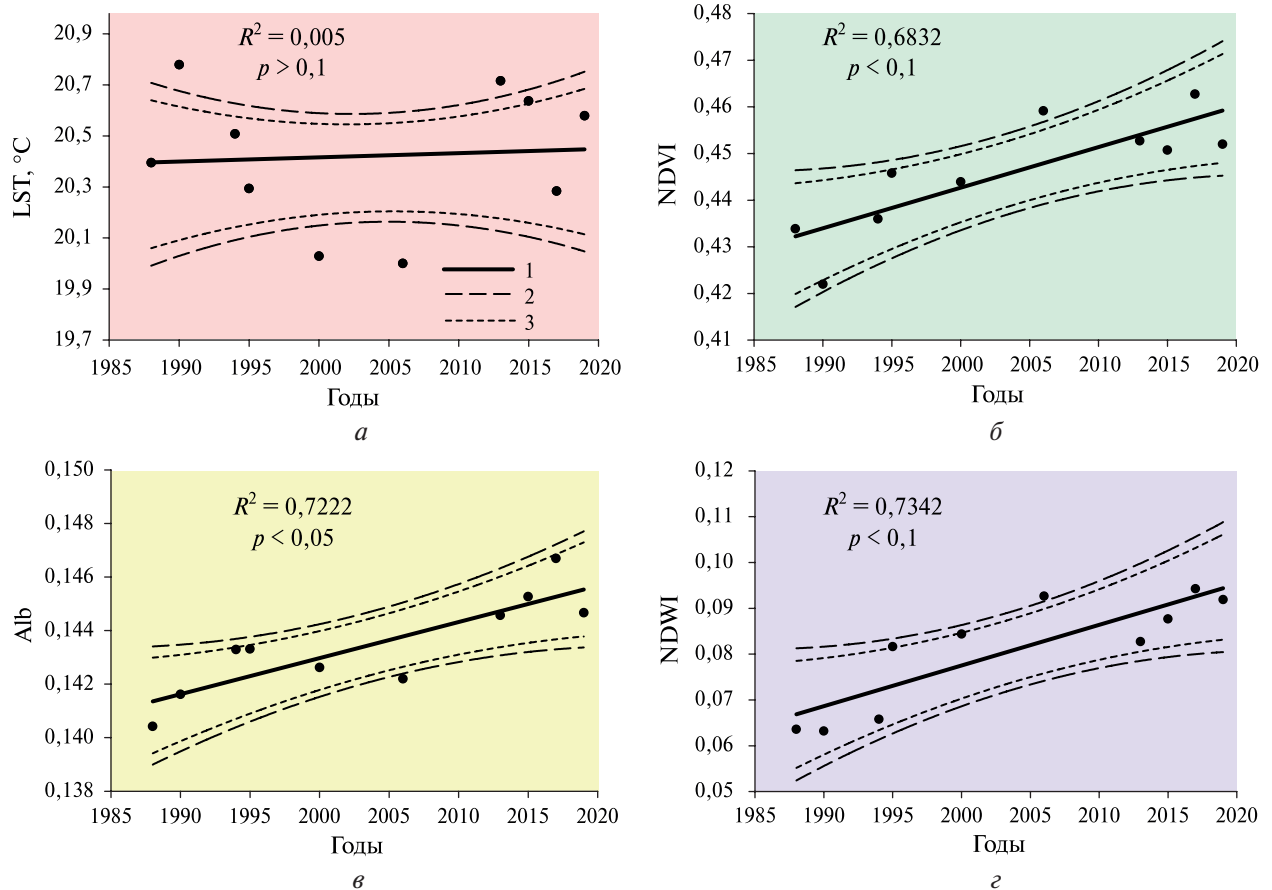


Рис. 5. Тренды средних значений параметров нормализованных изображений LST (а), NDVI (б), Alb (в) и NDWI (г) по району А. 1 — линия тренда; 2, 3 — границы доверительной области линии тренда для $\alpha = 0,05$ и $\alpha = 0,1$ соответственно

На рис. 5, б (см. с. 192) приведены графики, характеризующие тренды изменения средних значений параметров нормализованных изображений LST, NDVI, Alb и NDWI в районах А и Б, а также границы доверительной области линий трендов для уровней значимости $\alpha = 0,05$ и $\alpha = 0,1$. На графиках также показаны значения коэффициентов детерминации (R^2) и величины доверительной вероятности (p). Незначимый ($p > 0,1$) тренд параметра LST и разброс значений, не превышающий двух МК (см. рис. 5а) по району А, свидетельствуют об отсутствии тенденций изменения температуры поверхности.

Изменения параметров NDVI и NDWI по району А (см. рис. 5б, г) демонстрируют незначительные, но значимые ($p < 0,1$) тренды повышения значений, что указывает на процесс увеличения объёмов зелёной фитомассы, связанный, скорее всего, с восстановлением РП на нарушенных до 1988 г. участках поверхности. Незначительный, но значимый рост Alb ($p < 0,05$) (см. рис. 5в) также может быть признаком развития растительности, поскольку открытые грунты (кроме песка) имеют более низкие значения Alb по сравнению с РП.

В районе Б более позднего (после 1990 г.) освоения отмечается только незначительный ($p < 0,1$) тренд повышения Alb, в то время как по параметрам LST, NDVI и NDWI тренды незначимы ($p > 0,1$) (см. рис. б), что указывает на общую относительную стабильность состояния растительного покрова и отсутствие тех типов нарушений ландшафта, последствия которых наблюдаются в районе А.

Аналогичный сравнительный анализ для различных геоморфологических уровней района А показал, что процесс восстановления напочвенного РП в основном проявляется в границах III морской террасы, где отмечаются значимые ($p < 0,05$) тренды повышения параметров NDVI, Alb и NDWI, в то время как в границах II надпойменной террасы они незначимы ($p > 0,1$). На нарушенных участках дренированных морских террас восстановление раститель-

ности, как правило, проходит гораздо медленнее по сравнению с более влажными поймами и надпойменными террасами, что регистрируется только на длительном (31 г.) временном интервале.

На рис. 7а приведены кривые, характеризующие изменения суммарной площади участков (S_T) без растительности ($NDVI < 0,18$) для районов А и Б. В районе А к концу периода наблюдений отмечается более чем двукратное снижение параметра S_T , в то время как в районе Б только полуторакратное его снижение. Снижение S_T , скорее всего, связано с восстановлением РП на нарушенных при строительстве участках.

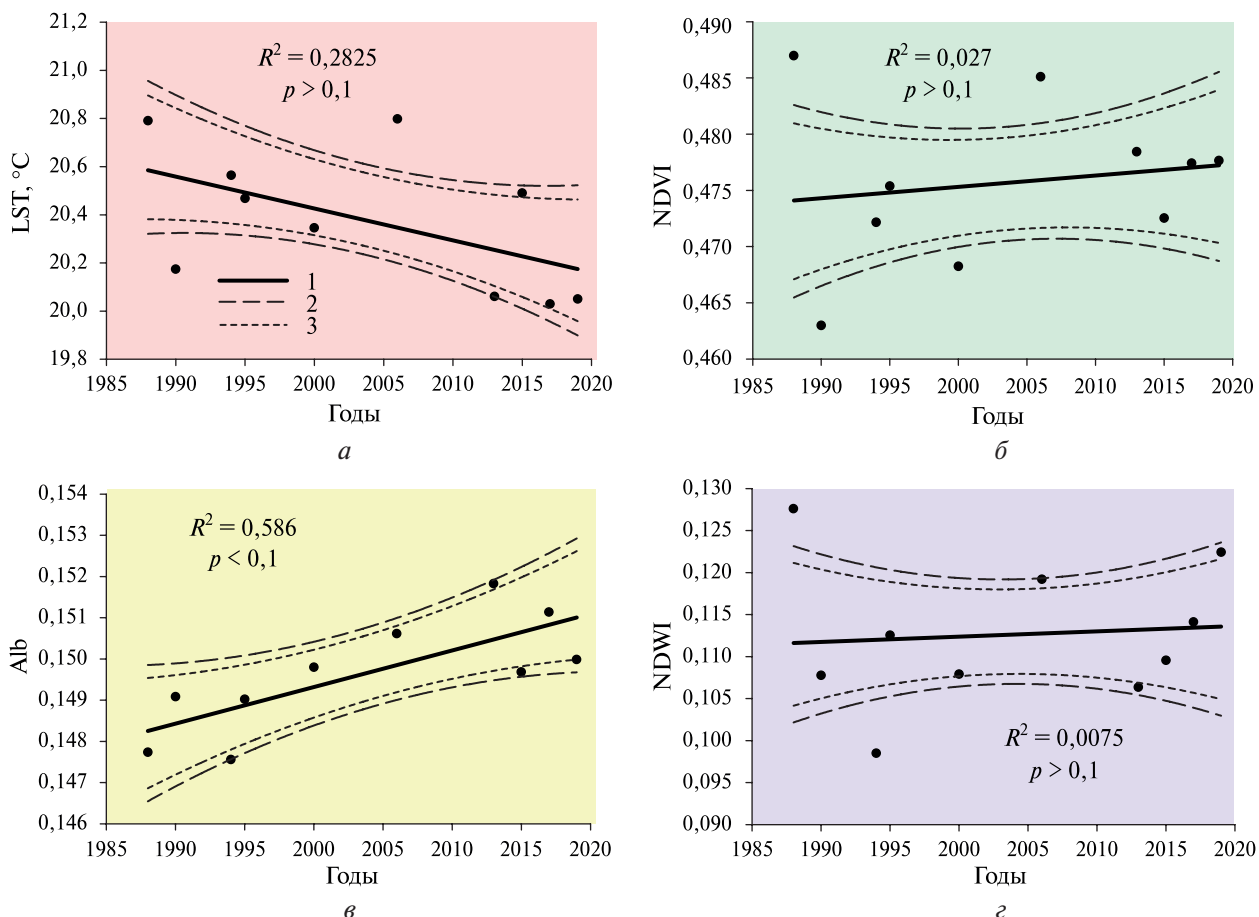


Рис. 6. Тренды средних значений параметров нормализованных изображений LST (а), NDVI (б), Alb (в) и NDWI (г) по району Б. 1 — линия тренда; 2, 3 — границы доверительной области линии тренда для $\alpha = 0,05$ и $\alpha = 0,1$ соответственно

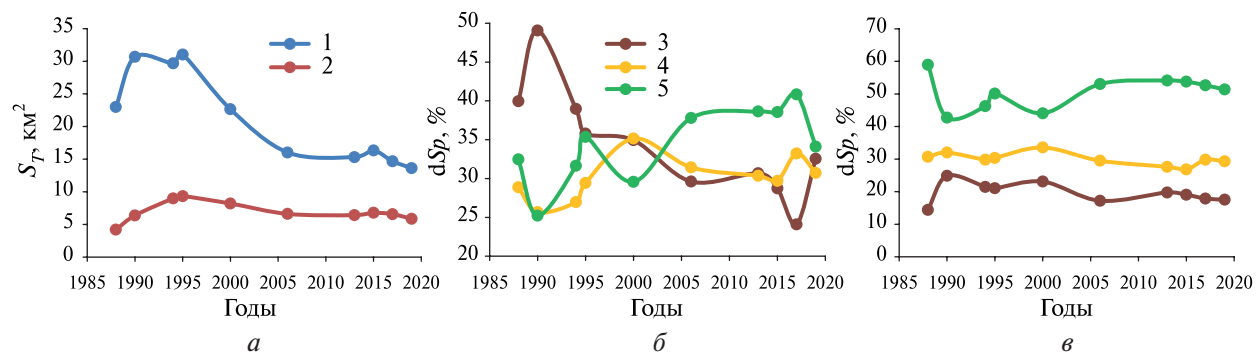


Рис. 7. Многолетние изменения суммарной площади участков без растительности ($NDVI < 0,18$) (а) и долей площади растительного покрова с интервальными значениями индекса NDVI в районах А (б) и Б (в). 1 — район А; 2 — район Б; 3 — $NDVI = 0,18-0,40$; 4 — $NDVI = 0,41-0,50$; 5 — $NDVI = 0,51-0,80$

Для анализа изменений площадей растительного покрова с разными значениями индекса NDVI рассчитывался параметр dS_p :

$$dS_p = \frac{S_i}{S_o} \times 100 \%, \quad (3)$$

где S_i — площадь, занимаемая РП в i -й интервальной группе NDVI; S_o — общая площадь, занимаемая РП в районе анализа; i — номер интервальной группы NDVI ($i = 1, 2, 3$). Установленные интервалы индекса NDVI: 1 — 0,18–0,40; 2 — 0,41–0,50; 3 — 0,51–0,80.

В районе А доля площади РП со значениями NDVI в интервале 0,18–0,40 снизилась почти в два раза (рис. 7б). Соответственно, заметно увеличились доли площадей РП с более высокими значениями индекса NDVI, что указывает на процесс увеличения объёмов зелёной фитомассы, в том числе за счёт сокращения площади открытой почвы и грунта на участках с размерами в 1 пиксель. В районе Б не отмечаются аналогичные тенденции изменения dS_p (рис. 7в), что также указывает на отсутствие той степени реакции на антропогенное воздействие, которая наблюдается в районе А.

На рис. 8 (см. с. 194) приведены карты-схемы, характеризующие изменение нормализованных изображений по параметрам LST, NDVI, Alb и NDWI в районе В, полученные путём вычитания распределения параметров 1988 г. из значений распределения 2019 г. Вертикальными чёрными линиями на гистограммах обозначены границы областей погрешностей нормализации, рассчитанных согласно выражению (1). В целом по характеру распределения и гистограммам видно, что по параметру LST наблюдается равенство площадей повышения и понижения значений, в то время как по параметрам NDVI, Alb и NDWI отмечается преобладание повышенных значений. Изменения параметров по району В в целом подтверждают приведённый выше вывод о тенденциях изменения их средних значений в границах всего района А.

Аномальное повышение значений NDVI (см. рис. 8б) приурочено в основном к техногенным объектам и связано с восстановлением растительности на нарушенных до 1988 г. участках поверхности.

На рис. 8 чёрными контурами с цифрами обозначены участки аномальных изменений по каждому параметру, сочетание и направленность которых характеризует тот или иной тип трансформации РП. В частности, участок № 1 может быть типичным примером восстановления растительности после многократных проездов гусеничного транспорта. Об этом свидетельствует повышение параметров NDVI, NDWI и Alb (частично) и снижение LST. Увеличение объёма зелёной фитомассы сопровождается повышением количества влаги на поверхности растительности, снижением LST за счёт повышения транспирации и влажности в слое СКТ, а также ростом альбедо, предположительно, за счёт сокращения доли открытых грунтов в пикселе.

На участке № 2 отмечаются те же признаки восстановления РП, однако параметр LST здесь повысился, что указывает на снижение влажности в слое СКТ и дренирование поверхности. Факт антропогенного воздействия в виде многочисленных следов разезда транспорта на участке № 2 подтверждается космическим снимком высокого пространственного разрешения (рис. 9а, см. с. 195). Рост температуры (LST) может быть объяснён только уменьшением содержания влаги во всём почвенно-растительном покрове, в том числе, возможно, из-за сокращения площади близлежащего озера (см. рис. 8).

Дренирование поверхности на водоразделах приводит к повышению теплоизоляционных свойств почвенно-растительного покрова, увеличению глубины сезонно-талого слоя и деградации мерзлоты, поскольку в более продолжительное зимнее время, когда тепловой поток направлен снизу вверх, покров с более высокой теплоизоляцией при прочих равных условиях препятствует более глубокому промерзанию грунтов (O'Donnell et al., 2009).

На другом фрагменте космического снимка высокого пространственного разрешения (рис. 9б) видно, что на участке № 3 поверхность вокруг водоёма покрыта лишайником (светлые тона) без явных следов антропогенного воздействия. По данным Landsat здесь отмечается повышение LST, снижение NDVI и незначительное повышение Alb и NDWI (см. рис. 8).

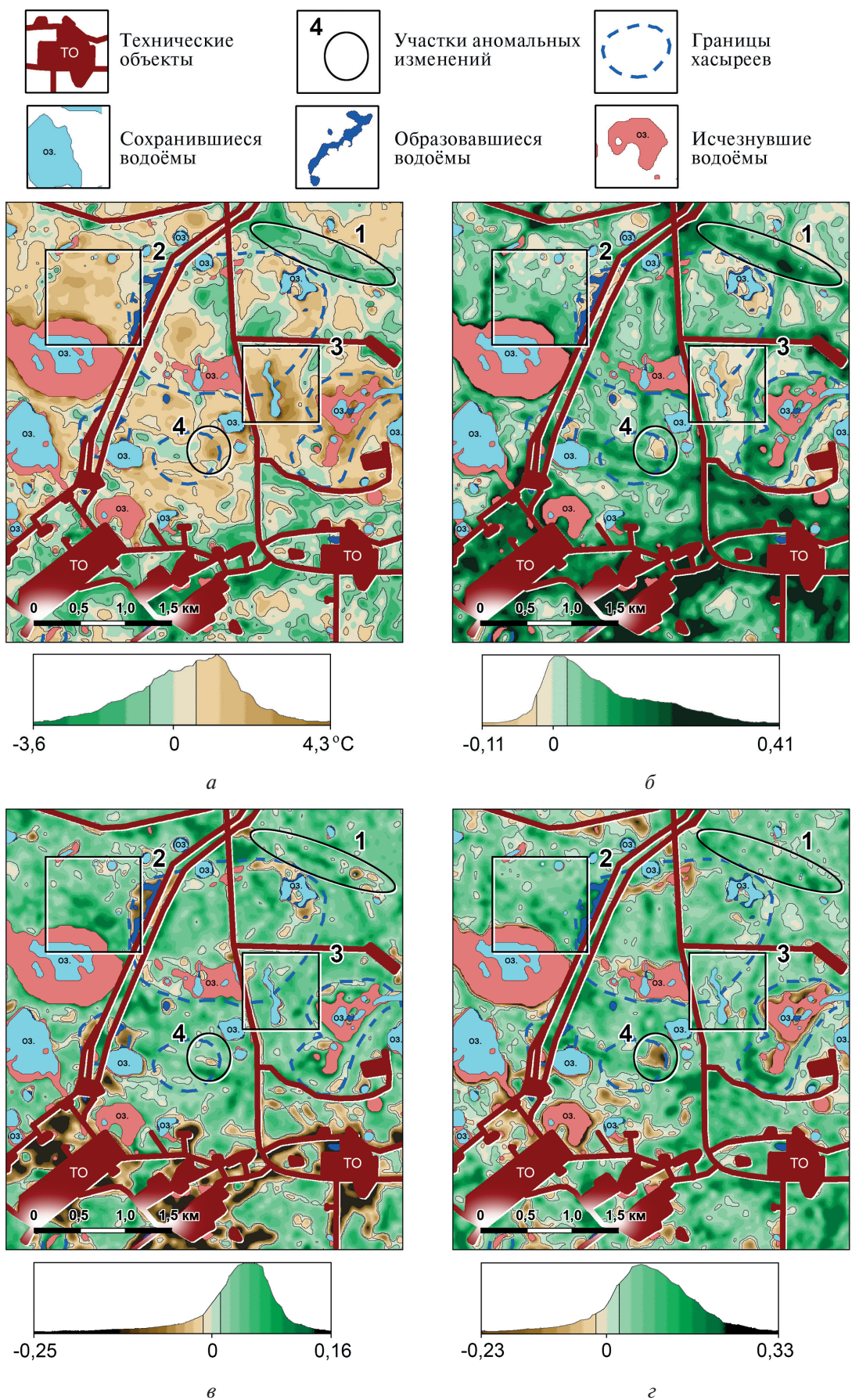


Рис. 8. Карты-схемы распределения разности значений параметров LST (а), NDVI (б), Alb (в), NDWI (г) за период с 1988 по 2019 г. в районе В

Подобное сочетание изменений параметров также может быть связано с дренированием поверхности. Трансформации покрова могут быть следствием изменения условий поверхностного стока в результате строительства дорог и газопровода. На участке № 4 (см. *рис. 8*) отмечается повышение LST и снижение параметров NDVI, NDWI и Alb, что соответствует признакам деградации РП и дренирования поверхности.

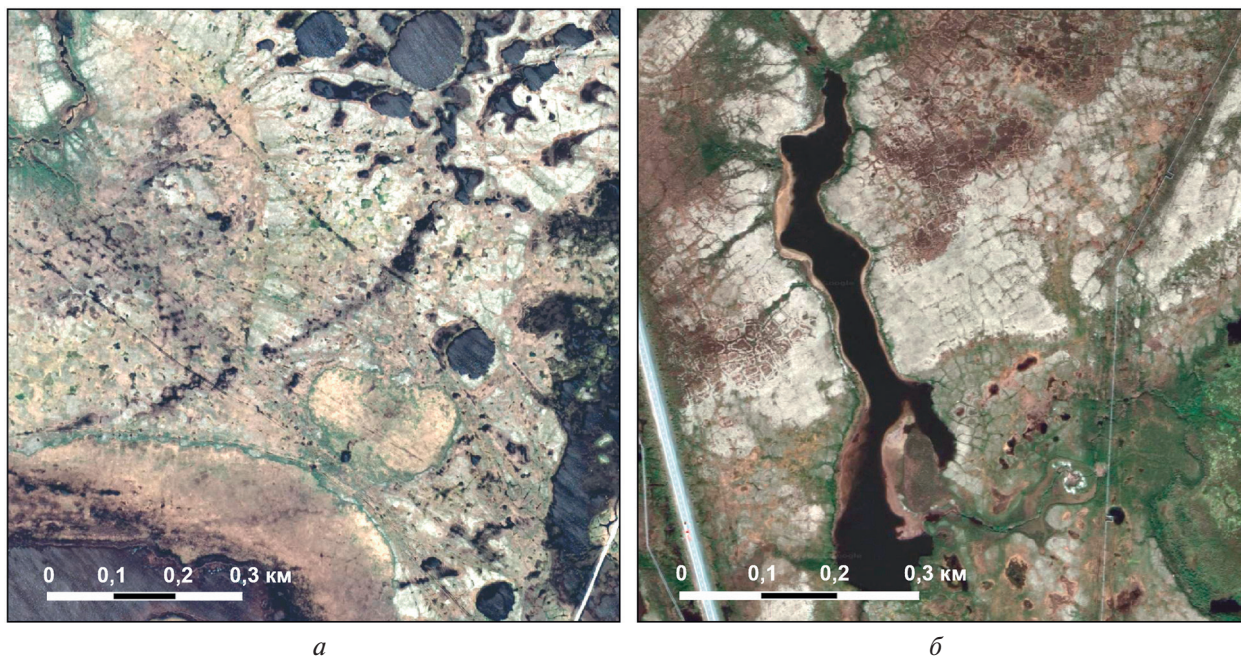


Рис. 9. Фрагменты космического снимка высокого пространственного разрешения (съёмка 15.06.2020) участка № 2 со следами разъездов транспорта (*а*) и участка № 3 без следов антропогенного воздействия (*б*) в районе В (<https://earth.google.com>)

Район Г как фрагмент района Б характеризуется меньшими диапазонами изменений параметров и меньшей площадью аномальных изменений (*рис. 10*, см. с. 196). Данный факт подтверждает вывод о том, что в районе Б нарушения покрова были не столь существенны в сравнении с районом А. В районе Г отмечается заметный рост Alb (см. *рис. 10в*), в то время как по остальным параметрам наблюдается приблизительно равенство площадей повышения и снижения значений. Заметное снижение LST в центральной части района Г вблизи технических объектов (см. *рис. 10а*) свидетельствует о повышении влажности почвенно-растительного покрова, что способствует стабилизации состояния мёрзлых грунтов. В районе Г заметно увеличение площади водоёмов, в частности на участке № 1 (см. *рис. 10*), где происходит заполнение хасырея водой. В границах участка № 1 также отмечается локальное повышение индекса NDWI, в то время как параметры LST и NDVI практически не изменились. Изменение биофизических характеристик покрова в хасырее, по всей видимости, не связано с подступающей водой, поскольку заполнение хасырея, как правило, происходит очень быстро. На фрагменте космического снимка высокого пространственного разрешения (съёмка 20.07.2021) участок № 2 в районе Г захватывает зону обустройства песчаного карьера, граничащего с водоёмом (*рис. 11а*, см. с. 197). По данным Landsat в 1988 и в 2019 гг. этот водоём представлял собой хасырей с небольшим озерком (см. *рис. 10*). Зона обустройства карьера проявляется локальным повышением LST и существенным снижением значений всех остальных параметров, что характерно в случаях деградации или уничтожения РП. Расположенный рядом участок № 3 захватывает песчаную отсыпку с горизонтальной факельной установкой, в которой сжигаются промышленные стоки (*рис. 11б*). Видно, что вблизи отсыпки растительность отсутствует. Так же как и в предыдущем примере, по данным Landsat здесь вокруг объекта отмечается локальное повышение LST и существенное снижение остальных параметров (см. *рис. 10*).

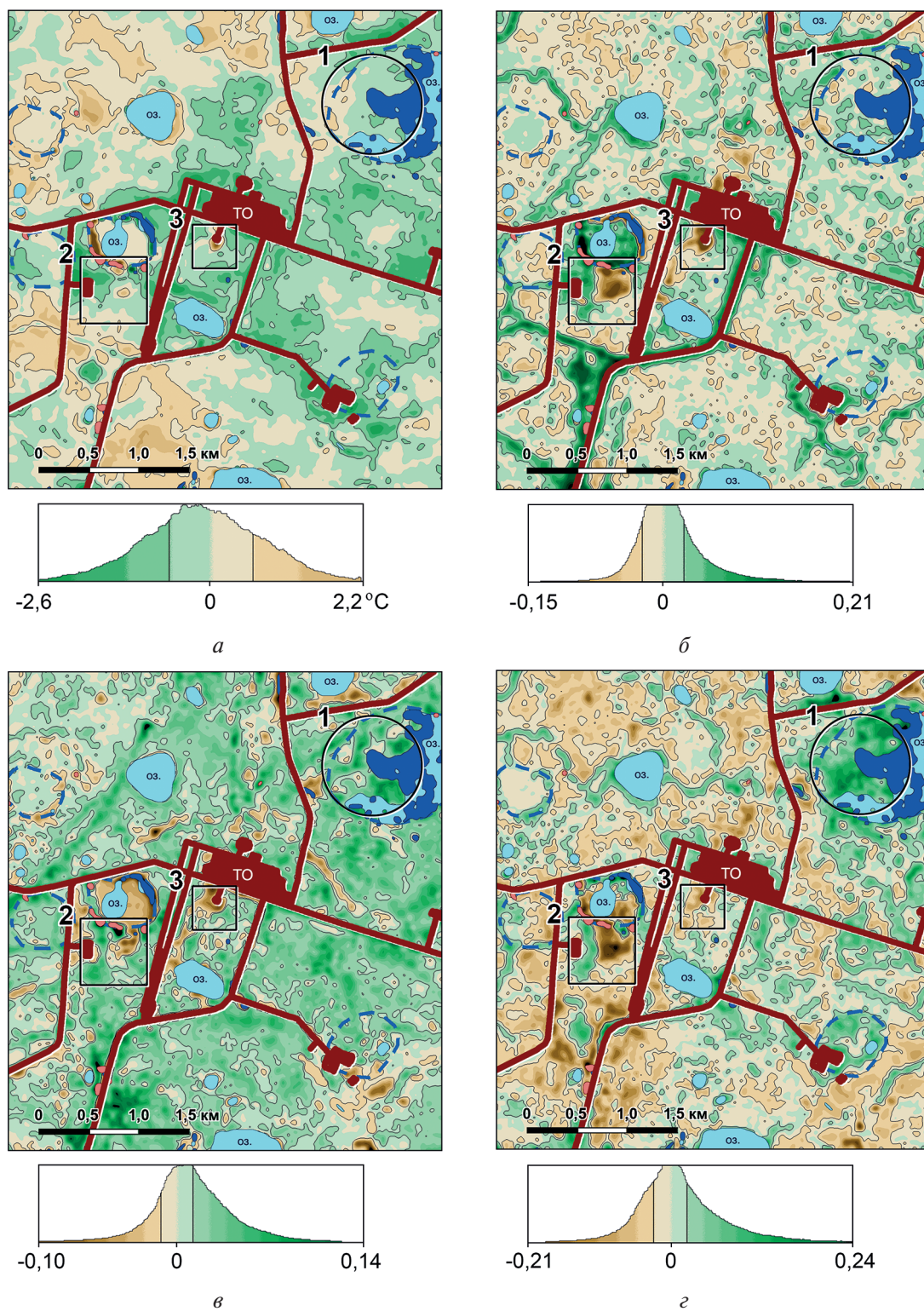


Рис. 10. Карты-схемы распределения разности значений параметров LST (а), NDVI (б), Alb (в), NDWI (з) за период с 1988 по 2019 г. в районе Г. Условные обозначения на рис. 8

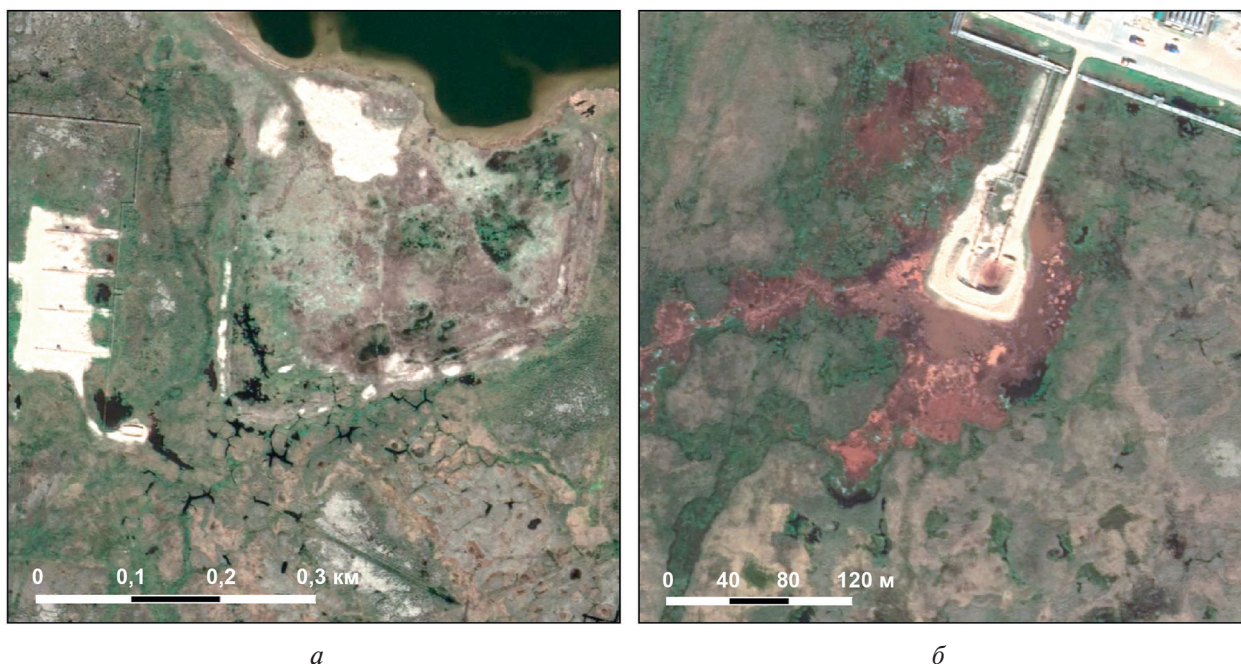


Рис. 11. Фрагменты космического снимка высокого пространственного разрешения (съёмка 20.07.2021) участка № 2 обустройства песчаного карьера (а) и участка № 3 расположения горизонтальной факельной установки (б) в районе Г (<https://earth.google.com>)

Заключение

Впервые в границах территории освоения Ямбургского НГКМ на основе многопараметрического анализа данных, полученных со спутников Landsat за период с 1988 по 2019 г., охарактеризованы трансформации напочвенного растительного покрова, обусловленные антропогенным воздействием. В отличие от Бованенковского НГКМ, где тренд повышения температуры поверхности (LST) в пойменных районах расположения основных технических объектов свидетельствует о дренировании поверхности (Корниенко, 2022), на Ямбургском НГКМ по этому параметру не отмечаются какие-либо преобладающие тенденции, связанные с антропогенным воздействием. В то же время подобный, условно нулевой баланс изменения средних значений температуры поверхности на Ямбургском НГКМ объясняется паритетом процессов её локального понижения и повышения из-за различной реакции ландшафтов на антропогенное воздействие.

Доминирующие тенденции повышения средних значений параметров NDVI, Alb и NDWI в районе более длительного освоения Ямбургского месторождения указывают на увеличение объёмов зелёной фитомассы в процессе восстановления растительности на нарушенных до 1988 г. участках поверхности. К важной особенности следует отнести различия в трендах изменения параметров в районе А для разных геоморфологических уровней. При равной плотности размещения технических объектов в границах III морской террасы отмечаются значимые тренды повышения NDVI, Alb и NDWI, в то время как в границах II надпойменной террасы практически нет значимых изменений этих параметров.

В настоящее время увеличение объёмов зелёной фитомассы в криолитозоне связывается с общим потеплением климата (Московченко и др., 2017; Тишков и др., 2018). Выявленные на фоне климатического тренда признаки развития фитоценозов на Ямбургском НГКМ могут быть следствием формирования локального микроклимата, обусловленного влиянием техногенных объектов, что в совокупности с глобальным потеплением может привести к усилению процессов деградации мерзлоты и росту эмиссии биогенных газов. Отсутствие значимых трендов изменения параметров LST, NDVI, NDWI и слабое повышение Alb в районах

более позднего освоения указывают на относительную стабильность состояния напочвенного покрова, что может быть связано с применением более рациональных и экологически безопасных подходов при строительстве объектов и обустройстве месторождения.

В целом полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения метода многопараметрического анализа данных со спутников Landsat в комплексе с методикой относительной радиометрической нормализации изображений для мониторинга, характеристики и картографического моделирования антропогенных трансформаций напочвенного растительного покрова в осваиваемых районах Арктики и Субарктики.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания № 122022800264-9 по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата».

Литература

1. *Елсаков В. В.* Спектральные различия характеристик растительного покрова тундровых сообществ сенсоров Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 92–101. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-92-101.
2. *Корниенко С. Г.* Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 106–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129.
3. *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. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-128-136.
4. *Московченко Д. В., Арефьев С. П., Глазунов В. А., Тигеев А. А.* Изменение состояния растительности и геоэкологических условий Тазовского полуострова (восточная часть) за период 1988–2016 гг. // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 6. С. 3–13. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(3-13).
5. *Павлушин В. Б., Быкова А. В., Лобастова С. А.* Мониторинг техногенного оврагообразования на объектах добычи углеводородного сырья в условиях криолитозоны // Инженер. изыскания. 2015. № 3. С. 60–68.
6. *Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Кренке А. Н., Тертицкий Г. М.* «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2(30). С. 31–44. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44.
7. *Ardelean F., Onaca A., Chetan M.-A., Dornik A., Georgievski G., Hagemann S., Timofte F., Berzescu O.* Assessment of spatio-temporal landscape changes from VHR images in three different permafrost areas in the Western Russian Arctic // Remote Sensing. 2020. V. 12. No 23. Art. No. 3999. DOI: 10.3390/rs12233999.
8. *Canty M. J., Nielsen A. A.* Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively Re-weighted MAD transformation // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. No. 3. P. 1025–1036. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.013>.
9. *Gao B.* NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. P. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
10. *Jacob F., Olioso A., Gu X. F., Su Z., Seguin B.* Mapping surface fluxes using airborne visible, near infrared, thermal infrared remote sensing data and a spatialized surface energy balance model // Agronomie. 2002. V. 22. P. 669–680. DOI: 10.1051/agro:2002053.
11. *Liang S.* Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I — Algorithms // Remote Sensing of Environment. 2000. V. 76. P. 213–238. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00205-4.
12. *Mann H. B.* Nonparametric tests against trend // Econometrica. 1945. V. 13. P. 245–259.
13. *Nelson P. R., Maguire A. J., Pierrat Z., Orcutt E. L., Yang D., Serbin S. et al.* Remote sensing of tundra ecosystems using high spectral resolution reflectance: Opportunities and challenges // J. Geophysical Research: Biogeosciences. 2022. V. 127. Art. No. e2021JG006697. <https://doi.org/10.1029/2021JG006697>.
14. *Nill L., Grünberg I., Ullmann T., Gessner M., Boike J., Hostert P.* Arctic shrub expansion revealed by Landsat-derived multitemporal vegetation cover fractions in the Western Canadian Arctic // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 281. Art. No. 113228. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113228>.
15. *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. V. 174. No. 12. P. 646–651. DOI: 10.1097/SS.0b013e3181c4a7f8.

16. *Rahman M. M., Hay G. J., Couloigner I., Hemachandran B., Bailin J. A.* A Comparison of four radiometric normalization techniques for mosaicing H-res multi-temporal thermal infrared flight lines of a complex urban scene // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015. V. 106. P. 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.05.002>.
17. *Roy D. P., Kovalskyy V., Zhang H. K., Vermote E. F., Yan L., Kumar S. S., Egorov A.* Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 185. P. 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.024>.
18. *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. V. 238. P. 350–357.
19. *Tucker C. J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. V. 8. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
20. *Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. V. 89. P. 467–483. DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.
21. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *Intern. J. Remote Sensing*. 2006. V. 27. No. 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.
22. *Yan L., Yang J., Zhang Y., Zhao A., Li X.* Radiometric Normalization for Cross-Sensor Optical Gaofen Images with Change Detection and Chi-Square Test // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Art. No. 3125. <https://doi.org/10.3390/rs13163125>.
23. *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. V. 10. No. 12. Art. No. 124020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124020>.

Characteristics of anthropogenic transformations of the ground cover in the area of Yamburg gas field based on Landsat satellite data

S. G. Kornienko

*Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow 119333, Russia
E-mail: spaceakm2@ogri.ru*

The study results of anthropogenic transformations of the ground vegetation cover in the areas of construction and operation of the Yamburgskoye oil and gas condensate field facilities on the Tazovsky Peninsula are presented. The study was conducted using 10 summer Landsat-5, -7, -8 satellite images from 1988 to 2019 on the basis of parameters characterizing land surface temperature (LST), albedo (Alb), chlorophyll content (NDVI), and moisture (NDWI) of the ground cover. The description of multiyear trends and local changes in LST, Alb, NDVI, and NDWI was performed using the technique of relative radiometric normalization of images, which makes it possible to increase the sensitivity of multi-temporal data analysis by reducing the influence of factors not related to anthropogenic impact. In the area of longer development (since 1984), dominant growth trends of average NDVI, Alb, and NDWI values were revealed, indicating an increase in the volume of green phytomass in the process of revegetation after its disturbance during construction and maintenance of technical facilities. The absence of significant trends in changes in the average LST values in the area as a whole is explained by the parity of local processes of surface temperature decrease and increase caused by different responses of the landscapes to anthropogenic impact. The absence of significant trends in NDVI and NDWI in the area of later development indicates relative stability of the vegetation cover, which may be an evidence of more rational and environmentally friendly approaches to the construction of facilities and field development. Fragments of detailed maps describing the change of parameters over 31 years confirm these conclusions. The trends of increasing green phytomass volumes revealed against the background of the climatic trend are associated with anthropogenic impact and may be a consequence of local microclimate development, which, together with global warming, may lead to intensification of permafrost degradation processes and growth of biogenic gas emission.

Keywords: albedo, anthropogenic impact, remote sensing, cryogenic landscapes, ground vegetation, temperature, transformations, trends, tundra, Yamburgskoye field, NDVI, NDWI

Accepted: 28.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-184-201

References

1. Elsakov V. V., Spectral differences in vegetation cover characteristics of tundra communities by Landsat sensors, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 92–101 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-92-101.
2. Kornienko S. G., Characteristics of anthropogenic transformations of landscapes in the area of Bovanenkovo gas field based on Landsat satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 106–129 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129.
3. Lavrinenko I. A., Map of technogenic disturbance of Nenets Autonomous District, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 128–136 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-128-136.
4. Moskovchenko D. V., Arefyev S. P., Glazunov V. A., Tigeev A. A., Changes in vegetation and geocryological conditions of the Tazovsky peninsula (eastern part) for the period of 1988–2016, *Kriosfera Zemli*, 2017, Vol. 21, No. 6, pp. 3–13 (in Russian), DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(3-13).
5. Pavlunin V. B., Bykova A. V., Lobastova S. A., Monitoring of technogenic ravine formation at hydrocarbon production objects in the permafrost conditions, *Inzhenernye izyskaniya*, 2015, No. 3, pp. 60–68 (in Russian).
6. Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Vaisfeld M. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Tertitsky G. M., “The greening” of the tundra as a driver of the modern dynamics of Arctic biota, *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2018, No. 2(30), pp. 31–44 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44.
7. Ardelean F., Onaca A., Chetan M.-A., Dornik A., Georgievski G., Hagemann S., Timofte F., Berzescu O., 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, Art. No. 3999, DOI: 10.3390/rs12233999.
8. Canty M. J., Nielsen A. A., Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively Re-weighted MAD transformation, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 3, pp. 1025–1036, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.013>.
9. Gao B., NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 58, pp. 257–266, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
10. Jacob F., Olioso A., Gu X. F., Su Z., Seguin B., Mapping surface fluxes using airborne visible, near infrared, thermal infrared remote sensing data and a spatialized surface energy balance model, *Agronomie*, 2002, Vol. 22, pp. 669–680, DOI: 10.1051/agro:2002053.
11. Liang S., Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I — Algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2000, Vol. 76, pp. 213–238, DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00205-4.
12. Mann H. B., Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 1945, Vol. 13, pp. 245–259.
13. Nelson P. R., Maguire A. J., Pierrat Z., Orcutt E. L., Yang D., Serbin S. et al., Remote sensing of tundra ecosystems using high spectral resolution reflectance: Opportunities and challenges, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, Vol. 127, Art. No. e2021JG006697, <https://doi.org/10.1029/2021JG006697>.
14. Nill L., Grünberg I., Ullmann T., Gessner M., Boike J., Hostert P., Arctic shrub expansion revealed by Landsat-derived multitemporal vegetation cover fractions in the Western Canadian Arctic, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 281, Art. No. 113228, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113228>.
15. 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, pp. 646–651, DOI: 10.1097/SS.0b013e3181c4a7f8.
16. Rahman M. M., Hay G. J., Couloigner I., Hemachandran B., Bailin J., An Assessment of Polynomial Regression Techniques for the Relative Radiometric Normalization (RRN) of High-Resolution Multi-Temporal Airborne Thermal Infrared (TIR) Imagery, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 11810–11828, DOI: 10.3390/rs61211810.
17. Roy D. P., Kovalskyy V., Zhang H. K., Vermote E. F., Yan L., Kumar S. S., Egorov A., Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 185, pp. 57–70, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.024>.
18. Schieldge 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, pp. 350–357.

19. Tucker C.J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, Vol. 8, pp. 127–150, DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
20. 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, pp. 467–483, DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.
21. Xu H., Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, No. 14, pp. 3025–3033, DOI: 10.1080/01431160600589179.
22. Yan L., Yang J., Zhang Y., Zhao A., Li X., Radiometric Normalization for Cross-Sensor Optical Gaofen Images with Change Detection and Chi-Square Test, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Art. No. 3125, <https://doi.org/10.3390/rs13163125>.
23. 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, Art. No. 124020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124020>.