

Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat

С. Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, 119333, Россия

E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Приведены результаты оценки трансформаций природных ландшафтов криолитозоны в районе строительства и функционирования технических объектов Бованенковского нефтегазо-конденсатного месторождения на п-ове Ямал. Исследование проводилось с использованием 10 снимков спутников Landsat летних съёмок за период с 1988 по 2020 г. на основе параметров, характеризующих полуденную температуру поверхности (LST), альbedo (Alb), содержание хлорофилла (индекс NDVI) и влажность (индекс NDWI) напочвенного покрова. Анализ многолетних трендов средних значений параметров LST, Alb, NDVI и NDWI для оценки влияния антропогенных факторов на фоне глобальных и региональных изменений проводился с применением методики относительной радиометрической нормализации временного ряда мультиспектральных космических снимков. Коэффициенты уравнений для преобразования изображений и погрешности нормализации определялись на основе метода перекрёстной проверки. Значимость трендов оценивалась с использованием непараметрического теста Манна–Кендалла. Информативность параметров LST, Alb, NDVI и NDWI для характеристики трансформаций ландшафта была подтверждена результатами оценки изменений растительного покрова по космическим снимкам сверхвысокого пространственного разрешения 2004 и 2016 гг. В границах района, охватывающего все построенные к 2020 г. объекты, тренды незначительные (незначимы). В районе наиболее длительной техногенной нагрузки (на южном своде месторождения) отмечается более явный (значимый) рост LST и снижение NDWI, что свидетельствует о доминировании процессов дренирования поверхности. Тренды Alb и NDVI в этом районе незначимы, что указывает на отсутствие тенденций изменения состояния растительного покрова, связанного с антропогенным воздействием. Отмечается, что наблюдаемое повышение температуры поверхности на фоне глобального климатического тренда может стать дополнительным фактором увеличения глубины деятельного слоя и деградации мерзлоты. Полученные результаты позволяют предположить, что изменения параметров LST, Alb, NDVI и NDWI, характеризующие трансформации природных ландшафтов, не фиксируются за границами районов расположения промышленных и инфраструктурных объектов.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, радиометрическая нормализация, перекрёстная проверка, дистанционное зондирование, криогенный ландшафт, температура поверхности, альbedo, NDVI, NDWI, трансформации, тундра, Бованенковское месторождение

Одобрена к печати: 11.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129

Введение

Строительство и функционирование промышленных и инфраструктурных объектов в Арктической зоне неизбежно приводит к трансформациям природных ландшафтов в местах их расположения. С потеплением климата связывается увеличение продуктивности и озеленение арктической растительности, что для различных природных комплексов может привести к деградации или аградации мерзлоты (Конищев, 2009) и, как следствие, к изменению эмиссии парниковых газов. На локальном уровне нарушение растительного покрова и гидрологических условий на участках высокой льдистости грунтов может привести к развитию опасных геокриологических процессов (термокарст, термоэрозия, солифлюкция, морозное пучение и др.). В настоящее время масштабные наблюдения за трансформацией криогенных ландшафтов наиболее эффективно могут осуществляться с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в первую очередь данных мультиспектральной космической съёмки оптического диапазона, обеспечивающей широкий охват, приемлемую детальность

и периодичность наблюдений, а также высокую информативность для характеристики биофизических свойств поверхности.

Современные трансформации криогенных ландшафтов связываются с влиянием глобального потепления (Титкова, Виноградова, 2015; Beck, Goetz, 2011; Bhatt et al., 2017; Urban et al., 2014), пожарами (Holloway et al., 2020), а также антропогенными факторами воздействия (Лавриненко, 2018; Московченко, 2013; Ardelean et al., 2020; Kumpula et al., 2012; Yu et al., 2015). Наблюдаемый рост проективного покрытия травяной и кустарниковой растительности (Московченко, 2013; Тишков и др., 2018) может быть связан как с глобальным климатическим трендом, так и с изменением локального климата и/или гидрологических условий в границах осваиваемых районов. Неоднозначность оценки степени воздействия технических объектов на криогенные ландшафты обусловлена в том числе отсутствием обоснованных подходов, позволяющих разделять влияние природно-климатических (глобальных, региональных) и антропогенных (локальных) факторов. Актуальность проблемы также связана с вопросом о влиянии антропогенного воздействия на изменение объёмов эмиссии парниковых газов в районах распространения мёрзлых пород.

В последние десятилетия в арктических и субарктических зонах наиболее интенсивно идёт освоение нефтегазовых месторождений со строительством и эксплуатацией энергогенерирующих и энергозависимых объектов, в той или иной мере влияющих на состояние криогенных ландшафтов. Динамика и ареалы этого влияния наземными методами практически не исследовались ввиду чрезвычайной сложности проведения подобных наблюдений. Отдельные аспекты проблемы, касающейся происходящих трансформаций тундрового ландшафта в районе Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), ранее были рассмотрены в публикациях (Московченко, 2013; Ardelean et al., 2020; Kumpula et al., 2012). Цель настоящей работы — характеристика антропогенных (техногенных) трансформаций криогенных ландшафтов в районе Бованенковского НГКМ на основе ретроспективного анализа данных спутников Landsat.

Район исследований

Район Бованенковского НГКМ расположен в центральной части п-ова Ямал (рис. 1а, см. с. 108) и относится к северным субарктическим тундрам сплошного распространения многолетнемёрзлых пород с подземными льдами различного генезиса, значительная часть которых залегает достаточно близко к поверхности (Криосфера..., 2013). Для анализа была взята территория размерами 50×50 км (рис. 1б), охватывающая по периферии ненарушенные районы с относительно стабильным состоянием фитоценозов. На рис. 1б приведена карта геоморфологических уровней данной территории (Крицук, Дубровин, 2003). Промышленные и инфраструктурные объекты месторождения, построенные к 2020 г., расположены преимущественно в заболоченных поймах рек.

Природные ландшафты здесь характеризуются существенной неоднородностью почвенного покрова, густой сетью рек и озёр, 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 (Морозова, Магомедова, 2004). Напочвенный покров плотный, представлен в основном мхами и лишайниками толщиной от 2 до 15 см.

Для характеристики ареалов возможного антропогенного воздействия на ландшафт рассматривался крупный район А (обозначен белым цветом на рис. 1в), охватывающий объекты более ранней и более поздней постройки. По снимкам со спутников Landsat признаки антропогенных нарушений ландшафта на южном своде месторождения (прямоугольный район Б на рис. 1в) отмечаются с 1984 г. Признаки обустройства месторождения (строительство объектов и дорог) наблюдаются здесь с 1988 г. Наиболее интенсивное строительство происходило в период с 2009 по 2016 г.

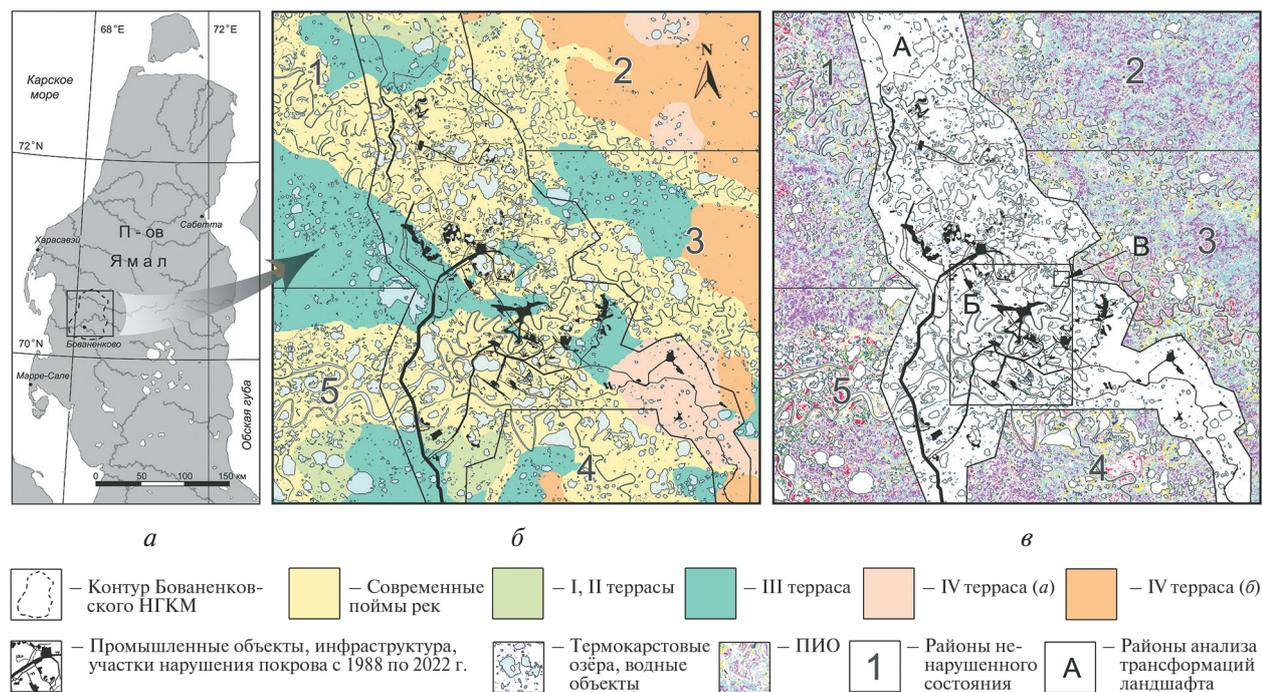


Рис. 1. Расположение территории исследований на п-ове Ямал (а); карта геоморфологических уровней и районов ненарушенного состояния (б); распределение псевдо-инвариантных областей (ПИО) и схема расположения районов для характеристики трансформаций ландшафтов на территории Бованенковского НГКМ (в)

Официально месторождение было введено в эксплуатацию 23 октября 2012 г. По мере обустройства месторождения осуществлялось строительство дорог и объектов в северном направлении, а наиболее интенсивное и длительное антропогенное воздействие на природный ландшафт происходило в границах района Б (см. рис. 1в). В границах небольшого района В (см. рис. 1в) по космическим снимкам сверхвысокого пространственного разрешения (КСВР) 2004 и 2016 гг. съёмки были установлены признаки трансформации ландшафта, а именно увеличение площади травяной (луговой) и редкой растительности за счёт уменьшения площади кустарников (Ardelean et al., 2020). Площадь анализируемой поверхности суши в границах района А составляет 659 км², района Б — 108 км², района В — 1,4 км².

Материалы и методика исследований

В работе использовались 10 мультиспектральных снимков со спутников Landsat-4, -5, -8 (табл. 1) с датами съёмки после схода паводковых вод, но до первых заморозков. Предварительная обработка снимков включала геометрическую коррекцию, калибровку спектральных каналов, формирование фрагментов на исследуемую территорию (см. рис. 1б).

Для районов арктических и субарктических тундр наиболее чувствительным к антропогенному воздействию выступает растительный покров (Лавриненко, 2018; Титкова, Виноградова, 2015; Yu et al., 2015), состояние которого может быть охарактеризовано по величине альбедо (Alb) (Liang, 2000) и спектральному вегетационному индексу NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) (Tucker, 1979). Трансформация мерзлоты у поверхности происходит преимущественно в результате изменений условий теплообмена мёрзлых грунтов с атмосферой и, как правило, связана с изменением влажности почвенно-растительного покрова. В этой связи информативны температура поверхности LST (англ. Land Surface Temperature) (Van de Griend, Owe, 1993; Weng et al., 2004) и спектральный индекс влажности NDWI (англ. Normalized Difference Water Index — нормализованный разностный водный индекс) (Gao, 1996). Для расчётов

LST использовались данные 6-го канала спутников Landsat-4, -5 и 10-го канала спутника Landsat-8. В данном случае параметр LST применялся для характеристики температуры поверхности в моменты прохождения спутников в дневное время. В работе значения параметра LST даны в градусах Цельсия.

Таблица 1. Используемые в работе космические снимки

Дата съёмки	Спутник	Местное время съёмки	Кадр (Path; Row)
31.07.1988	Landsat-4	11:32	166, 10; 166, 11
20.07.1990	Landsat-5	11:36	167, 10
15.07.1994	Landsat-5	11:34	
19.07.1998	Landsat-5	11:48	166, 10; 166, 11
25.08.2009	Landsat-5	12:06	167, 10
14.07.2011	Landsat-5	12:05	
19.07.2013	Landsat-8	12:18	
12.08.2016	Landsat-8	12:16	
23.07.2017	Landsat-8	12:10	
22.07.2020	Landsat-8	12:16	166, 10; 166, 11
			167, 10

Радиометрические характеристики и разрядность квантования (12 бит) сигналов с радиометров OLI (*англ.* Operational Land Imager) и TIRS (*англ.* Thermal Infrared Sensor) спутника Landsat-8 существенно улучшены по сравнению с радиометром TM (*англ.* Thematic Mapper) спутников Landsat-4, -5 (Landsat 8..., 2019). Однако поскольку в настоящей работе использовались данные спутников Landsat-4, -5, -8, итоговые изображения по этим параметрам, в том числе изображения с радиометров OLI и TIRS, формировались с 8-битной разрядностью, соответствующей разрядности квантования радиометра TM. Динамический диапазон изменения альбедо (Alb) — 0–1; диапазон изменения параметров NDWI и NDVI — от –1 до 1. Отсюда следует, что расчётный минимально различимый контраст изображений (Кадничанский, 2018) для альбедо составляет 0,0039, а для индексов NDWI и NDVI — 0,0078. Динамический диапазон 6-го теплового канала радиометра TM спутников Landsat-4, -5 — от 200 до 340 К, а эквивалентное шуму изменение температуры (NEΔT — *англ.* noise equivalent temperature difference) не превышает 0,3 К (Chander et al., 2009). Однако при 8-битном квантовании данных, поступающих со спутника, минимальный контраст на тепловых изображениях соответствует 0,54 К и в данном случае рассматривался как единый для всего ряда снимков, включая изображения с TIRS.

При формировании общей картины пространственно-временных вариаций параметров, рассчитанных по снимкам разных лет, возможны радиометрические искажения (погрешности), вызванные факторами, не связанными с земной поверхностью и существенно снижающими достоверность оценки изменений в ландшафте. К основным источникам погрешностей относятся различия углов и времени съёмки, условий пропускания атмосферы, калибровочных данных. Проблема касается в том числе и нормализованных индексов (NDVI и др.), рассчитанных по данным разных спутников Landsat (Елсаков, 2021; Kornienko, 2021). Минимизация подобных погрешностей может быть проведена с использованием методов относительной радиометрической нормализации, когда изображения всего временного ряда преобразуются к виду одного опорного изображения (Canty, Nielsen, 2008; Rahman et al., 2015; Scheidt et al., 2008). Методы относительной нормализации наиболее эффективны при линейных (одинаковых в границах анализируемой территории) изменениях интенсивности регистрируемого излучения, обусловленных совокупным влиянием перечисленных выше искажений. Под линейными изменениями (искажениями) в данном случае подразумеваются мультипликативные (изменение контрастов) и аддитивные (изменение средних значений) вариации интенсивности регистрируемого излучения, не связанные с изменением состояния

поверхности. Как правило, для преобразований используются уравнения линейной регрессии с коэффициентами, рассчитанными по данным, относящимся к стабильным, ненарушенным участкам поверхности — фоновым зонам (ФЗ). Очевидно, что при таком подходе также будут минимизированы вариации параметров, связанные с климатическими трендами, и на их фоне с большей вероятностью могут быть выявлены изменения, обусловленные антропогенным воздействием. Значения параметров итогового нормализованного изображения P_n^* определяются по уравнению:

$$P_n^* = AP_n + B, \quad (1)$$

где P_n — значение параметра исходного нормализуемого изображения; A и B — коэффициенты. В данном случае под P подразумевается любой из анализируемых параметров — LST, NDWI, Alb, NDVI. Коэффициенты A и B могут быть рассчитаны разными способами (Schott et al., 1988; Yuan, Elvidge, 1996), в том числе на основе линейных уравнений аппроксимации, характеризующих связь между значениями параметров опорного (P_o) и нормализуемого (P_n) изображений в границах ФЗ (Rahman et al., 2015) или так называемых псевдо-инвариантных (неизменённых) областей (ПИО) (Kim, Han, 2021; Schott et al., 1988).

Отличительная особенность используемой в настоящей работе методики относительной радиометрической нормализации состоит в применении алгоритма неконтролируемой классификации (*Isodata*) для определения ПИО, представленных в виде распределений классов типов поверхности с идентичными спектральными характеристиками пикселей опорного и нормализуемого снимков (Kornienko, 2021). Основанием такого подхода служит тот факт, что результаты классификации по алгоритму *Isodata* инвариантны (не меняются) при линейных изменениях интенсивности регистрируемого излучения. Линейные изменения спектральной яркости, обусловленные изменением атмосферных условий или иными факторами, не связанными с состоянием поверхности, практически не влияют на распределение пикселей по классам, поскольку принцип работы алгоритма *Isodata* основан на выявлении относительной разницы интенсивности спектральной яркости между пикселями при группировании их в классы.

Изменение состояние поверхности и, соответственно, изменение спектральных характеристик приводит к переходу пикселей из одного класса в другой. Если на совмещённых распределениях классов типов поверхности опорного и нормализуемого снимков пиксели с одними и теми же координатами относятся к разным классам, то это означает, что у этих пикселей разные (изменённые) спектральные характеристики и, соответственно, разные физические свойства. В этой связи формирование ПИО осуществляется на основе обоих распределений классов типов поверхности путём исключения пикселей с одними и теми же координатами, но относящихся к разным классам. По этому принципу для каждой пары снимков (опорный — нормализуемый) формируется своё распределение ПИО. В данном случае неконтролируемая классификация проводилась по значениям яркости в спектральных каналах 1–5, 7 радиометров ТМ и идентичных им каналах 2–7 радиометра OLI. Таким образом, предполагается, что псевдо-инвариантные области содержат пиксели с неизменившимися спектральными характеристиками, относящиеся к участкам стабильного состояния поверхности. В качестве примера на *рис. 1в* приведено распределение ПИО в границах фоновых зон, сформированное по снимкам 1988 и 1990 гг. Распределение ПИО представлено шестью ($n = 6$) классами типов поверхности. Каждый класс ($i = 1, \dots, n$) обозначен определённым цветом и соответствует расположению (координатам) пикселей с идентичными спектральными характеристиками опорного и нормализуемого снимков. На *рис. 1в* пиксели, не попавшие в псевдо-инвариантные области, обозначены белым цветом.

Процедура нормализации изображений выполнялась с использованием метода K -блочной перекрёстной проверки (ПП) (*англ.* *K-fold cross-validation*) (Воронцов, 2004; Marcot, Nanea, 2021), что позволяет минимизировать систематические ошибки, связанные с набором данных для обучения и тестирования модели (уравнения преобразования). Суть метода ПП (скользящего контроля) состоит в тестировании уравнения модели по наборам данных, не используемым для его расчёта (обучения).

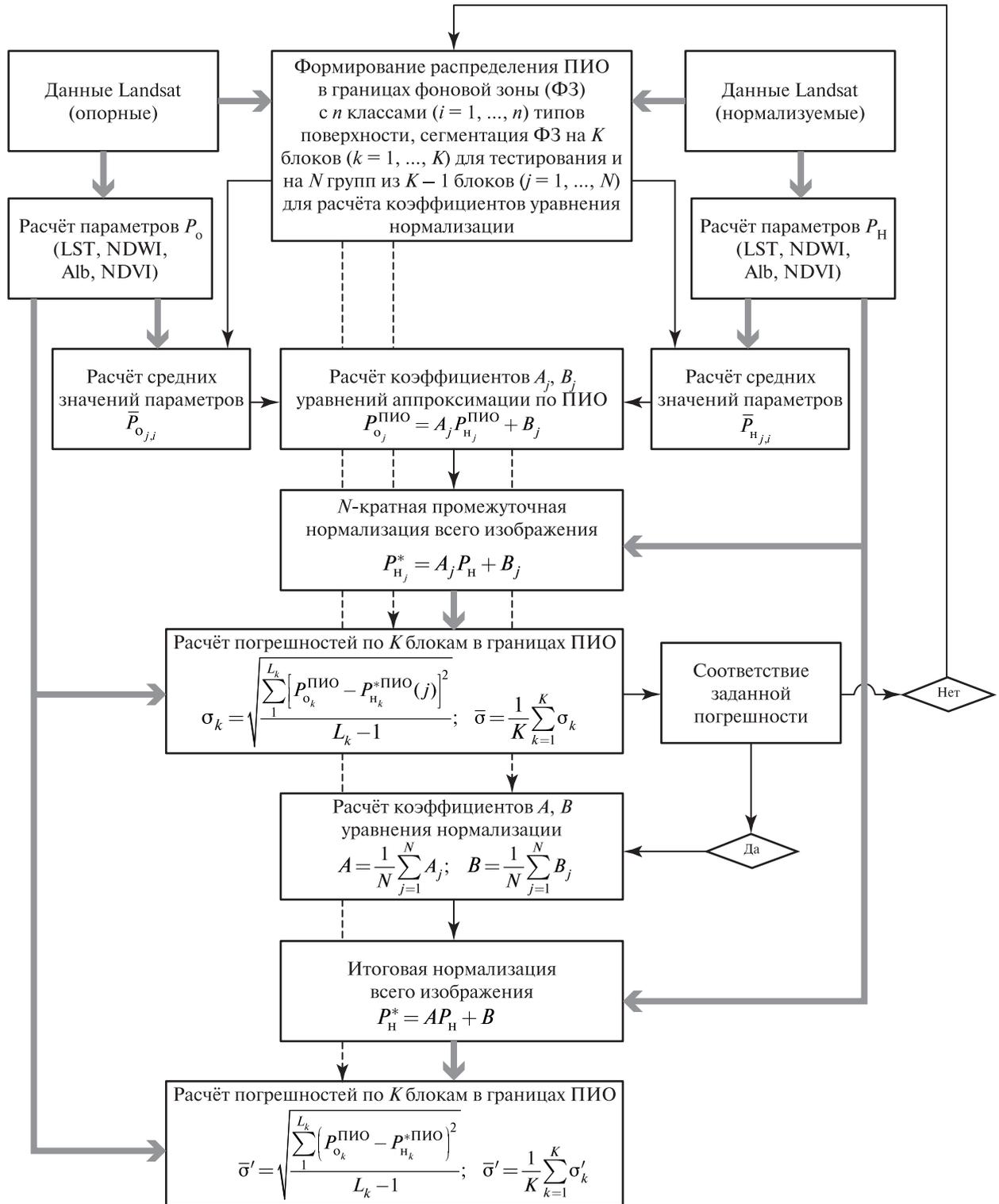


Рис. 2. Схема информационных потоков при нормализации изображений Landsat с использованием метода K-блочной перекрёстной проверки

Преимущество такого способа в том, что все данные используются для обучения модели несколько раз, в то время как для тестирования каждое значение параметра используется только один раз. Метод перекрёстной проверки применяется в том числе для расчёта, оптимизации и валидации моделей (уравнений преобразования) при анализе данных ДЗЗ (Piralilou et al., 2022; Sun et al., 2019; Xu et al., 2021). В данном случае обучаемой моделью выступает уравнение (1) для преобразования (нормализации) изображений.

На *рис. 1б* и *в* цифрами 1–5 обозначены районы ненарушенной фоновой зоны с ПИО, по которым методом *K*-блочной ПП определялись коэффициенты линейных уравнений (1) и погрешности нормализации изображений. На *рис. 2* (см. с. 111) приведена схема информационных потоков, этапов и последовательности обработки данных, относящейся к процедуре относительной радиометрической нормализации изображений Landsat с использованием метода *K*-блочной перекрёстной проверки. Стрелки серого цвета указывают на операции, в которых непосредственно используются данные Landsat, а также рассчитанные и преобразованные на их основе изображения, характеризующие распределения параметров LST, NDWI, Alb и NDVI.

Для каждого нормализуемого изображения на основе метода ПП определялись коэффициенты *A* и *B*, используемые в уравнении нормализации (1). Для этого вся ФЗ разбивалась на *K* блоков (*K* = 5) (см. *рис. 1в*) с приблизительно равным количеством пикселей. Для расчёта коэффициентов *A* и *B* поочередно используются *N* групп (*N* = 5) данных (*j* = 1, ..., *N*), состоящих из четырёх (*K* – 1) блоков (*рис. 3*), а для тестирования (расчёта погрешностей) поочередно используется один *k*-й блок (*k* = 1, ..., *K*), не используемый для расчёта коэффициентов *j*-й группы блоков. На *рис. 3а* приведён первый вариант использования данных, в котором для расчёта коэффициентов берётся группа блоков № 2–5 (*j* = 1), а для оценки погрешностей (тестирования) — блок № 1 (*k* = 1). В последнем (пятом) варианте для расчёта коэффициентов используются блоки № 1–4 (*j* = 5), а для тестирования — блок № 5 (*k* = 5) (*рис. 3б*). Вторым, третьим и четвёртым варианты формируются по аналогичному принципу.

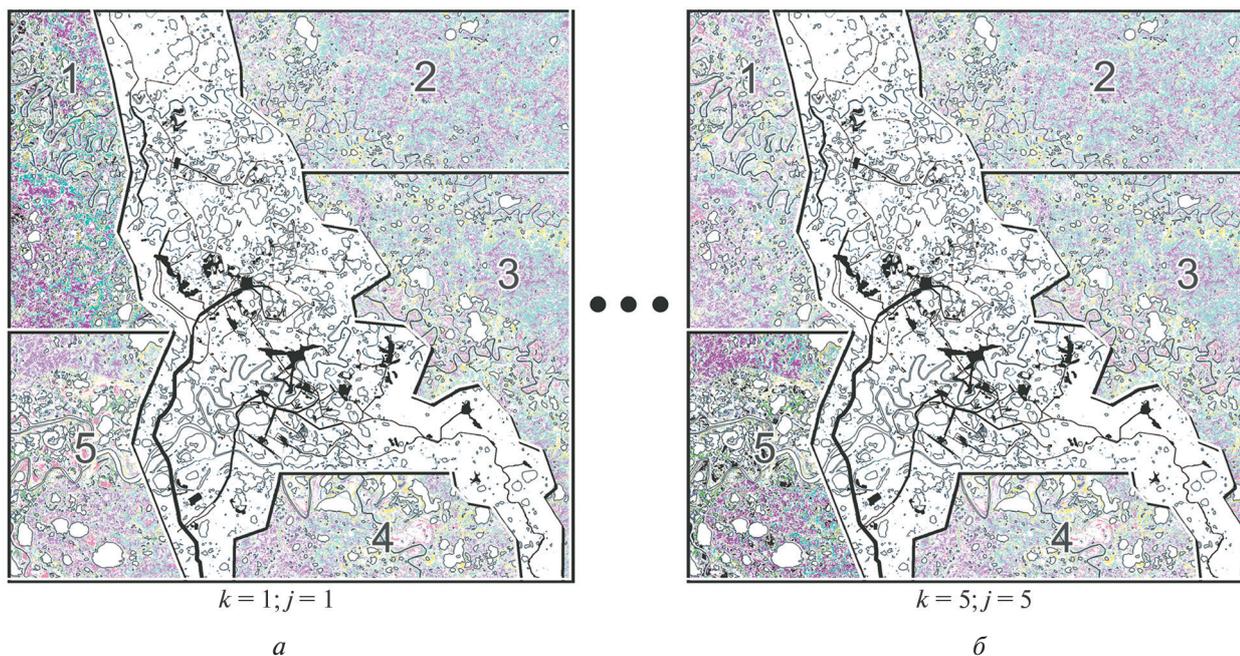


Рис. 3. Первый (*а*) и пятый (*б*) варианты использования данных фоновой зоны для расчёта коэффициентов уравнения нормализации изображений и оценки погрешностей с использованием метода *K*-блочной перекрёстной проверки; 1–5 — номера блоков данных

Расчёт коэффициентов *A* и *B* уравнения (1) проводился следующим образом. Для каждой *j*-й группы данных (*j* = 1, ..., 5) в границах каждого класса (*i* = 1, ..., 6) типов поверхности ПИО с доверительным интервалом 99 % определялись средние значения параметров $\bar{P}_{o,j,i}$ и $\bar{P}_{n,j,i}$ опорного и нормализуемого изображений, на основе которых методом наименьших квадратов рассчитывались коэффициенты *A_j* и *B_j* уравнений линейной аппроксимации:

$$P_{o_j}^{\text{ПИО}} = A_j P_{n_j}^{\text{ПИО}} + B_j,$$

где $P_{o_j}^{ПНО}$ — значения функции; $P_{н_j}^{ПНО}$ — значения аргумента соответственно опорного и нормализуемого изображений в границах ПНО j -й группы. Процесс повторяется N раз.

На рис. 4 приведены примеры определения уравнений аппроксимации по параметрам LST, NDWI, Alb и NDVI данных 1988 и 1990 гг. съёмки для группы $j = 1$ ($n = 6$). Значения y соответствуют $P_{o_j}^{ПНО}$, значения x — $P_{н_j}^{ПНО}$. Точками обозначены измеренные средние значения параметров в границах каждого класса типов поверхности, а планками — среднеквадратические отклонения, характеризующие их разброс. В частности, для параметра LST $A_1 = 1,5214$ и $B_1 = 4,4145$ (см. рис. 4а). Отклонения коэффициента A_j от единицы, а коэффициента B_j от нуля характеризуют степень различия нормализуемого и опорного изображений.

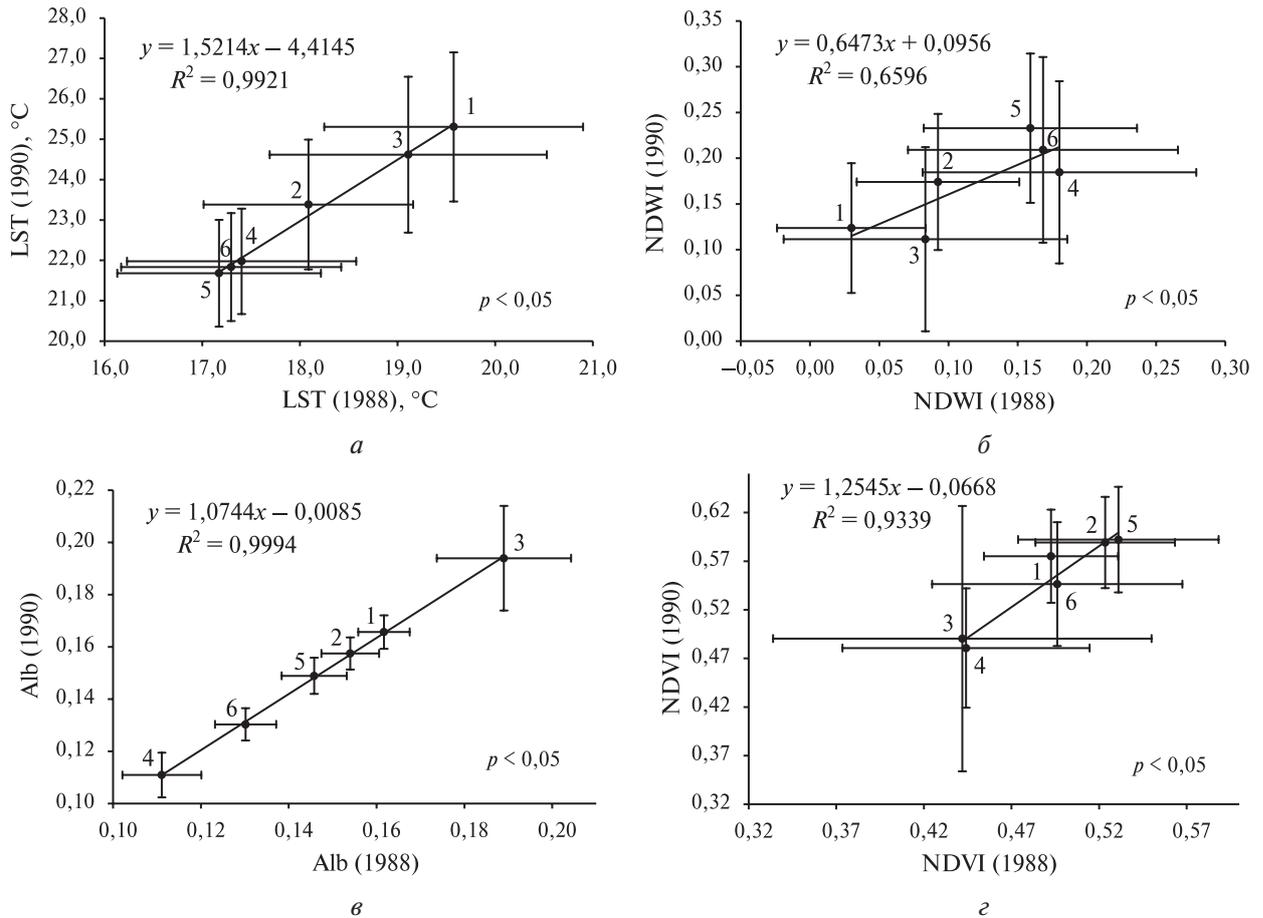


Рис. 4. Определение коэффициентов уравнений аппроксимации, характеризующих связь средних значений параметров LST (а), NDWI (б), Alb (в) и NDVI (г) опорных (1990) и нормализуемых (1988) изображений в границах ПНО ($j = 1$); 1–6 — номера классов типов поверхности

На промежуточном этапе в соответствии с принципами K -блочной перекрёстной проверки рассчитывались пять вариантов преобразования (нормализации) всего изображения на основе уравнения:

$$P_{н_j}^* = A_j P_{н} + B_j,$$

где $P_{н_j}^*$ — значения параметров после нормализации с использованием коэффициентов, рассчитанных по j -й группе.

На этапе тестирования для оценки погрешности и эффективности нормализации использовалось среднеквадратическое отклонение (СКО) (Rahman et al., 2014, 2015), которое рассчитывается попиксельно по каждому ($k = 1, \dots, 5$) из тестовых K блоков в границах ПНО:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_1^{L_k} [P_{O_k}^{\text{ПИО}} - P_{H_k}^{\text{ПИО}}(j)]^2}{L_k - 1}},$$

где $P_{O_k}^{\text{ПИО}}$ и $P_{H_k}^{\text{ПИО}}(j)$ — соответственно значения параметров опорного и нормализованного изображений по коэффициентам, рассчитанным для j -й группы изображения по каждому пикселу в k -м тестовом блоке в границах ПИО; L_k — число пикселей в k -м тестовом блоке в границах ПИО. Погрешности σ_k также определялись при 99%-м доверительном интервале распределений $P_{O_k}^{\text{ПИО}}$ и $P_{H_k}^{\text{ПИО}}(j)$. Далее, согласно методу ПП, рассчитывалась общая средняя погрешность нормализации изображения:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sigma_k.$$

В том случае если $\bar{\sigma}$ не превышает уровня приемлемых значений, рассчитываются коэффициенты A и B уравнения (1) как средние значений коэффициентов A_j и B_j :

$$A = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_j, \quad B = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N B_j.$$

На заключительном этапе проводится преобразование (нормализация) всего изображения с использованием уравнения (1), а также расчёт итоговой среднеквадратической погрешности $\bar{\sigma}'$ по методу K -блочной перекрёстной проверки:

$$\bar{\sigma}' = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sigma'_k, \tag{2}$$

$$\bar{\sigma}' = \sqrt{\frac{\sum_1^{L_k} (P_{O_k}^{\text{ПИО}} - P_{H_k}^{\text{ПИО}})^2}{L_k - 1}},$$

где $P_{H_k}^{\text{ПИО}}$ — значения параметров нормализованного по уравнению (1) изображения по каждому пикселу в k -м тестовом блоке в границах ПИО.

Если погрешность $\bar{\sigma}$ выше заданного уровня, то проводится корректировка начальных условий (см. рис. 2), заключающаяся в нахождении таких значений коэффициентов A_j и B_j , при которых величина $\bar{\sigma}$ будет минимальной и приемлемой. В частности, могут быть использованы различные подходы для определения коэффициентов уравнения (1) (Schott et al., 1988; Yuan, Elvidge, 1996) и псевдо-инвариантных областей (Kim, Han, 2021; Rahman et al., 2015; Xu et al., 2021), в том числе изменение количества классов типов поверхности при использовании алгоритма неконтролируемой классификации. В случае существенной разницы количества данных по блокам K значения погрешностей $\bar{\sigma}$ и $\bar{\sigma}'$ могут различаться. В данном случае различия значений $\bar{\sigma}$ и $\bar{\sigma}'$ по всем параметрам были значительно ниже минимально различимых контрастов.

В настоящем исследовании все изображения нормализовались относительно данных съёмки 1990 г., выбранных в качестве опорных. В табл. 2 приведены рассчитанные согласно формуле (2) значения среднеквадратических отклонений ($\bar{\sigma}'$), характеризующих погрешности нормализации изображений по каждому параметру за каждый год. После процедуры нормализации шкалы параметров всех нормализованных изображений соответствуют шкалам опорных изображений.

Методы относительной радиометрической нормализации позволяют проводить оценку изменений параметров со среднеквадратическим отклонением, достаточно близким к уровню минимальных контрастов изображений (Rahman et al., 2014, 2015). При нормализации

изображений с максимальной детальностью (с учётом каждого пикселя) значения СКО будут существенно зависеть от точности взаимной координатной привязки опорного и нормализованного снимков.

Таблица 2. Значения среднеквадратических отклонений ($\bar{\sigma}'$), характеризующих погрешности нормализации изображений

Год съёмки	LST, °C	NDWI	Alb	NDVI
1988	0,74	0,033	0,0110	0,019
1994		0,031	0,0137	0,027
1998	0,96	0,035	0,0144	0,036
2009	0,98	0,042	0,0149	0,027
2011	0,74	0,039	0,0170	0,040
2013	0,92	0,032	0,0155	0,039
2016	0,98	0,034	0,0192	0,047
2017	0,85	0,053	0,0171	0,052
2020	0,72	0,036	0,0163	0,042
Средние	0,85	0,037	0,0154	0,036

Водные поверхности, объекты строительства и участки явных нарушений поверхности по каждому году маскировались и исключались из анализа. Маска водных объектов формировалась на основе индекса MNDWI (*англ.* Modified Normalized Difference Water Index — модифицированный нормализованный разностный водный индекс) (Xu, 2006). Объекты строительства маскировались по значениям индекса NDVI < 0,18, а также визуально методами ландшафтно-индикационного дешифрирования RGB-синтезированных изображений Landsat (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий). Поскольку изображения каждого года съёмки нормализовались относительно изображений 1990 г., все вариации параметров в районах строительства объектов оценивались относительно состояния ненарушенных (фоновых) территорий 1990 г. При данном подходе нормализация изображений и оценка антропогенных трансформаций ландшафтов на фоне климатических трендов реализуются при условии, что в границах ненарушенных (фоновых) территорий за весь период анализа не было радикальной смены фитоценозов (растительных сообществ), сопровождающейся существенным изменением спектральных характеристик поверхности.

Характеристика возможных трансформаций ландшафтов на территории Бованенковского НГКМ проводилась на основе анализа многолетних изменений (трендов) средних значений параметров LST, NDWI, Alb и NDVI. Поскольку маскировались все водные поверхности, промышленные и инфраструктурные объекты, а также участки явных нарушений ландшафта, произошедших за период с 1988 по 2020 г., то, по сути, анализировались неявные изменения на участках вблизи техногенных объектов. Предполагается, что трансформации ландшафта на этих участках могли произойти опосредованно, в том числе из-за изменений гидрологических и мерзлотных условий при строительстве, а также из-за выбросов в атмосферу и формирования микроклимата. Подобное влияние может быть неравномерным, разнонаправленным, с различной реакцией фитоценозов, болотных, речных и озёрных систем, сопровождающееся аномальными изменениями биофизических свойств поверхности на отдельных участках. В то же время изменение средних значений параметров в границах выбранных районов позволяет выявить общие, преобладающие тенденции, сопоставить их с климатическими трендами и прогнозировать наиболее вероятные последствия.

Оценка статистической значимости трендов (направленных изменений) по каждому параметру и по каждому району проводилась с использованием непараметрического теста Манна – Кендалла (Mann, 1945) с уровнями порога значимости $\alpha = 0,05$ и $\alpha = 0,1$.

Результаты и их обсуждение

На рис. 5–7 (см. с. 117) приведены многолетние тренды изменения средних значений параметров LST, NDWI, Alb и NDVI в границах районов А, Б и В, а также границы доверительной вероятности линий трендов для уровней значимости $\alpha = 0,05$ и $\alpha = 0,1$. Анализ статистической значимости трендов на основе теста Манна–Кендалла показал, что для района А тренды не значимы ни по одному из параметров, поскольку для каждого распределения p -значения были больше уровня значимости $\alpha = 0,1$ (см. рис. 5). Для района Б значимым оказался только тренд LST при $\alpha = 0,1$ ($p = 0,076$) (см. рис. 6а). Для района В при уровне $\alpha = 0,1$ значим тренд LST ($p = 0,076$) (см. рис. 7а), а при уровне $\alpha = 0,05$ оказались значимыми тренды параметров NDWI ($p = 0,048$), Alb ($p = 0,002$) и NDVI ($p = 0,029$) (см. рис. 7б–г). Район В может быть использован для верификации (подтверждения информативности) результатов, полученных по данным со спутников Landsat для характеристики трансформаций ландшафта по другим участкам. Тренды параметров по этому району характеризуют тип изменения поверхности, который установлен по КСВР (Ardelean et al., 2020) и подтверждают сам факт трансформации ландшафта. Таким образом, для приемлемых уровней значимости тренды параметров LST, NDWI, Alb и NDVI могут характеризовать изменения в ландшафте, в том числе связанные с антропогенным воздействием.

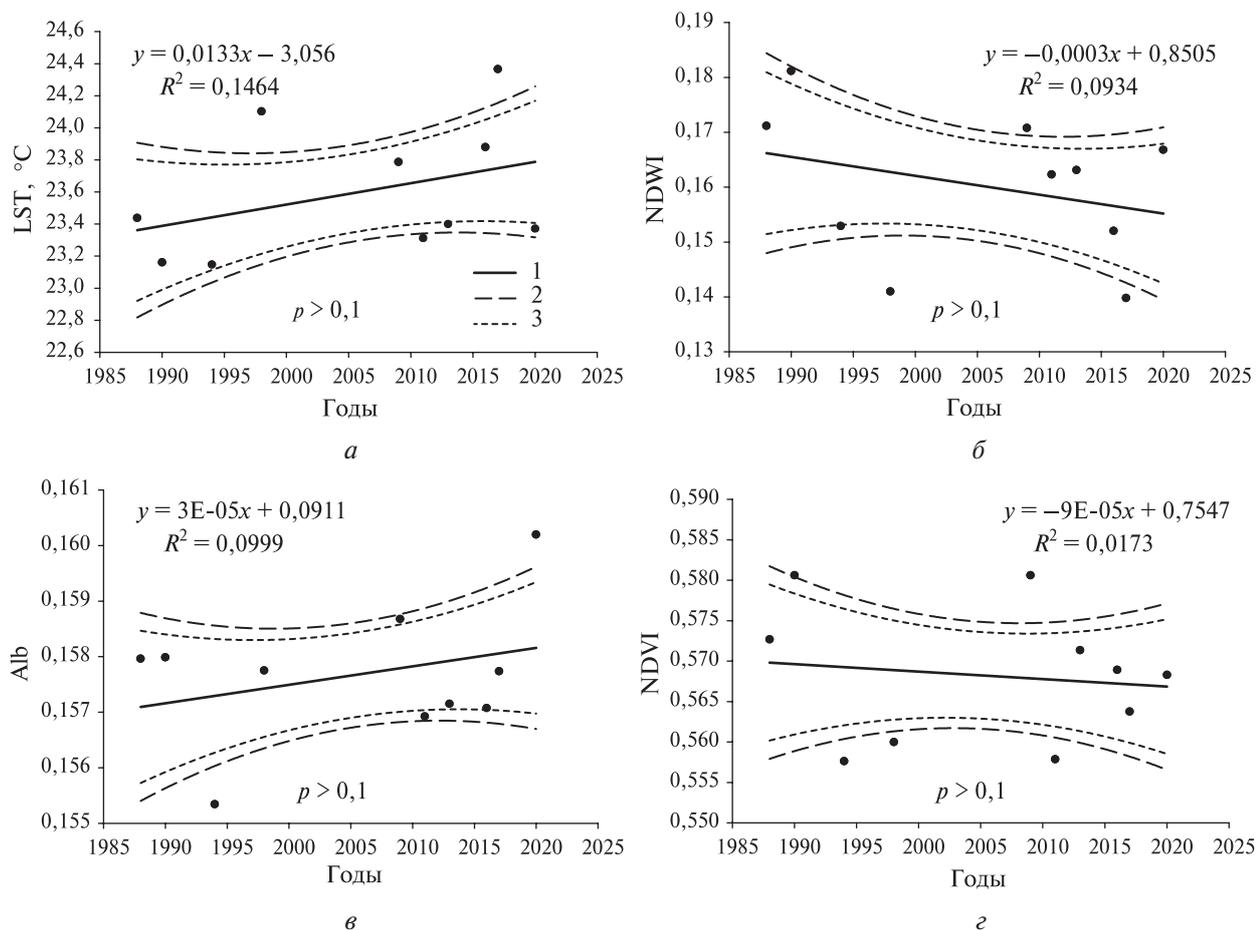


Рис. 5. Многолетние тренды изменения средних значений параметров LST (а), NDWI (б), Alb (в) и NDVI (г) для района А; 1 — линия тренда; 2, 3 — границы доверительной области линии тренда для $\alpha = 0,05$ и $\alpha = 0,1$ соответственно

В табл. 3 приведены данные, характеризующие наклон линии трендов средних значений параметров за весь период наблюдений (32 года).

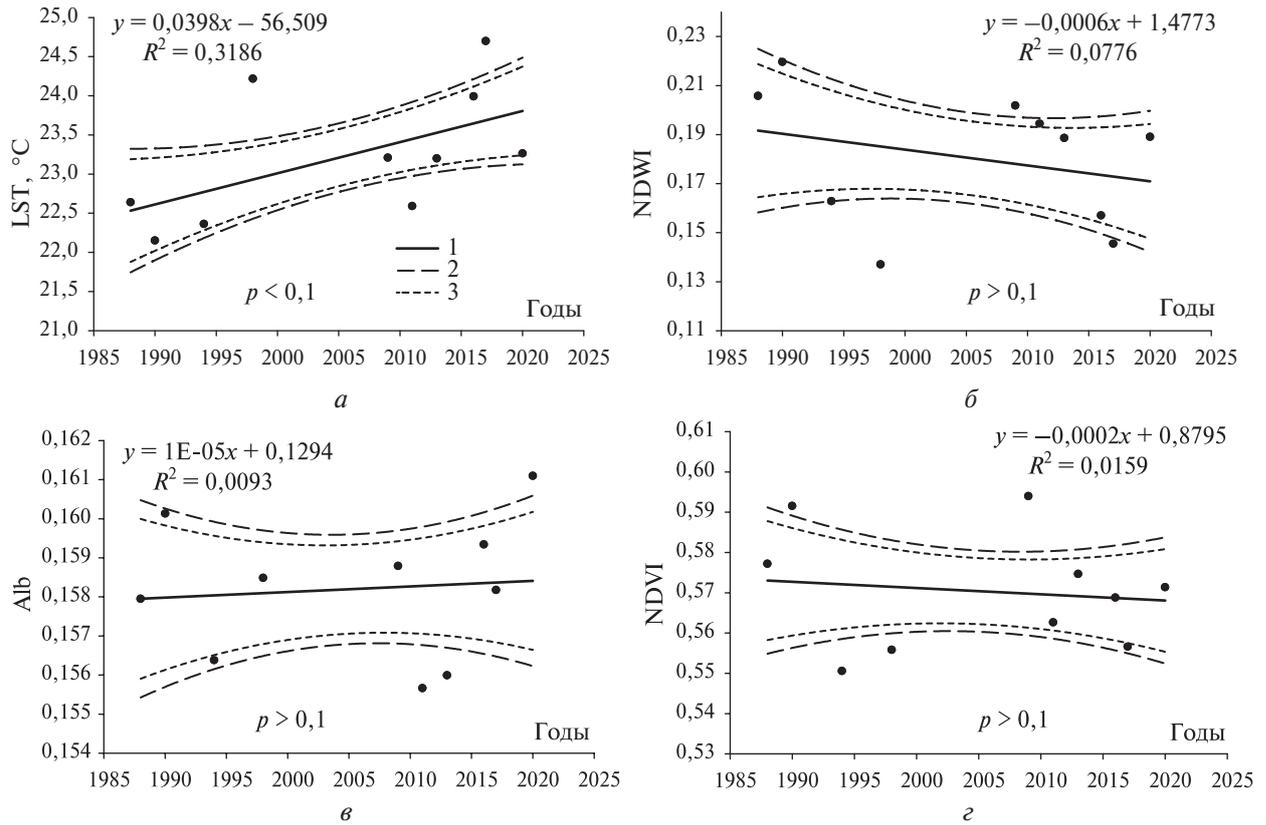


Рис. 6. Многолетние тренды изменения средних значений параметров LST (а), NDWI (б), Alb (в) и NDVI (г) для района Б; 1 — линия тренда; 2, 3 — границы доверительной области линии тренда для $\alpha = 0,05$ и $\alpha = 0,1$ соответственно

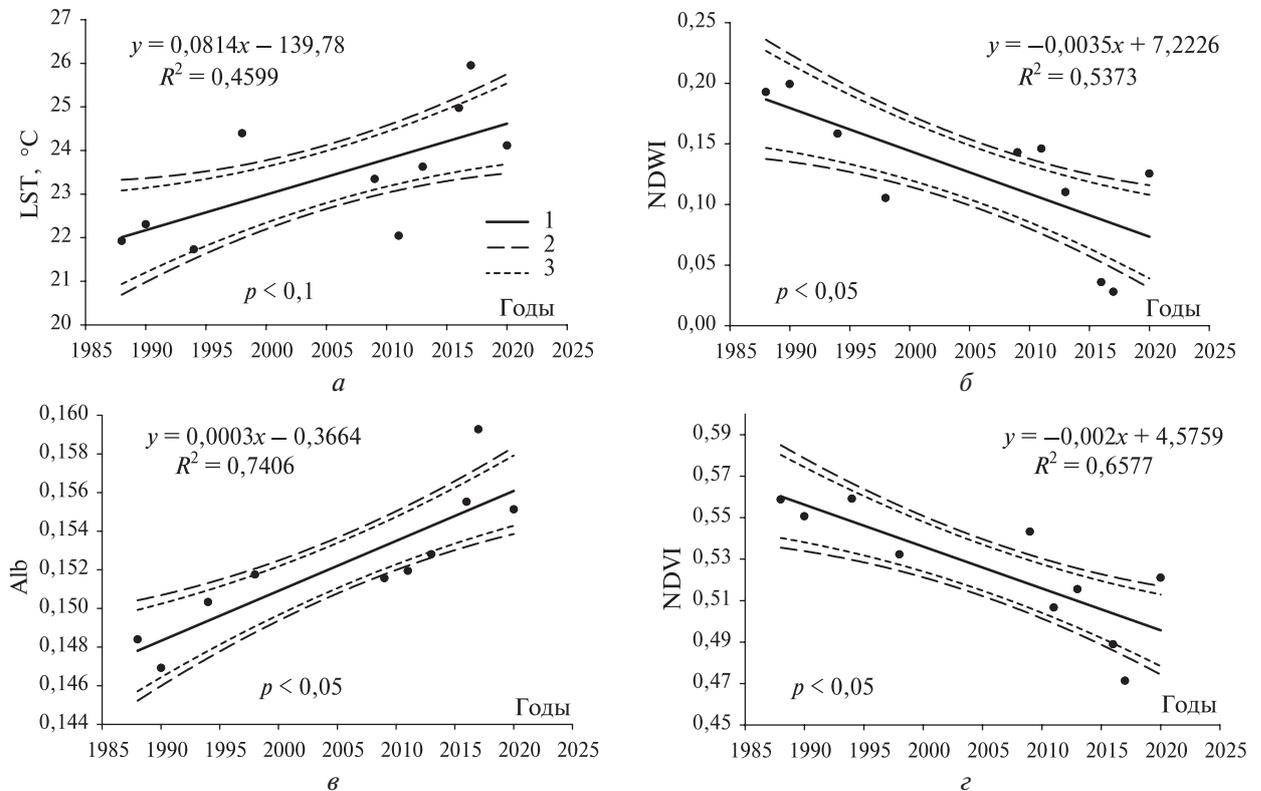


Рис. 7. Многолетние тренды изменения средних значений параметров LST (а), NDWI (б), Alb (в) и NDVI (г) для района В; 1 — линия тренда; 2, 3 — границы доверительной области линии тренда для $\alpha = 0,05$ и $\alpha = 0,1$ соответственно

Таблица 3. Наклон трендов средних значений параметров за 32 года по районам

Район	LST, °C	NDWI	Alb	NDVI
А	0,43	-0,0110	0,0010	-0,0030
Б	1,30	-0,0206	0,0005	-0,0049
В	2,60	-0,1132	0,0083	-0,0646

Незначительный разброс средних значений параметров для района А, соизмеримый с СКО нормализации (см. *рис. 5*), а также наклон трендов на уровне минимально различных контрастов (см. *табл. 3*) показывают, что в данном районе нет значимых доминирующих тенденций изменения параметров. Для района Б отмечается более высокий разброс и слабо-выраженный тренд повышения средних значений LST с наклоном 1,3 °C (~0,04 °C/год) (см. *рис. 6а, табл. 3*). Отрицательный наклон линии тренда NDWI для района Б почти в три раза превышает уровень минимального контраста (см. *рис. 6б, табл. 3*). По параметрам Alb и NDVI (см. *рис. 6в, г*) наклон трендов ниже минимальных контрастов (см. *табл. 3*), что также свидетельствует об отсутствии в районе Б каких-либо преобладающих тенденций изменения площади проективного покрытия и/или видового состава растительности.

Для района В отмечается наклон линии тренда LST в 2,6 °C и существенный наклон тренда индекса NDWI на 59 % (см. *рис. 7а, б, табл. 3*). Подобное связанное изменение параметров, а именно повышение LST и снижение NDWI, может свидетельствовать о снижении интенсивности транспирации и падении влажности поверхностного покрова. Менее заметный, но значимый рост Alb на 5,4 % и снижение NDVI на 11 % в районе В (см. *рис. 7в, г*) могут быть связаны с выявленным по КСВР изменением площади проективного покрытия и/или видового состава растительности. Общей тенденцией представляется положительный наклон линии трендов LST, Alb и отрицательный наклон трендов NDWI, NDVI (см. *табл. 3*). Повышение альбедо поверхности увеличивает долю отражённого излучения и снижает поглощение радиации, что при прочих равных условиях должно вести к снижению LST. Однако повышение температуры поверхности может происходить по причинам, никак не связанным с альбедо, в частности в результате снижения влажности, падения интенсивности транспирации и уменьшения тепловой инерции почвенно-растительного покрова. В ряде случаев положительная корреляция между LST и Alb объясняется более существенным (доминирующим) влиянием процесса испарения с влажной поверхности грунта или растительного покрова (Jacob et al., 2002). Снижение индексов NDWI и NDVI указывает на падение влажности и уменьшение объёма живой фитомассы, что для некоторых видов покрова может быть причиной роста альбедо.

На *рис. 8* (см. с. 119) приведены зависимости, характеризующие связь средних значений параметров LST и NDWI для районов Б и В за период наблюдений с 1988 по 2020 г. Достаточно высокие значения коэффициентов корреляции параметров ($R = 0,776$) для района Б и района В ($R = 0,908$) значимы при доверительной вероятности $p = 0,05$, что подтверждает сделанные ранее выводы об информативности LST и NDWI для характеристики влажности (степени дренирования) поверхности растительного покрова тундровых сообществ (Корниенко, 2020).

Слабая выраженность трендов изменения средних значений параметров по районам А и Б не означает, что здесь не происходили трансформации ландшафтов. Антропогенное воздействие, как правило, носит локальный характер и наблюдается вблизи технических объектов (Yu et al., 2015). Аналогично известным методам обнаружения изменений, нормализованные изображения позволяют картографировать и анализировать локальные изменения параметров на любом выбранном временном интервале. На *рис. 9* приведены распределения разности значений параметров ΔLST , $\Delta NDWI$, ΔAlb и $\Delta NDVI$ для района Б, построенные по данным съёмки 1990 и 2020 гг. В данном случае распределения параметров 1990 г. вычитались из распределений 2020 г. Изменения средних значений параметров в районе Б между 1990 и 2020 гг. достаточно близки к их общим трендам (см. *рис. 6*). Контурные границы между

пойменными и равнинными зонами (см. рис. 1) обозначены на рис. 9 тёмно-малиновым цветом, а контуры хасыреев (спущенных озёр) показаны синим. Границы водных поверхностей и технических объектов соответствуют их состоянию в 2020 г.

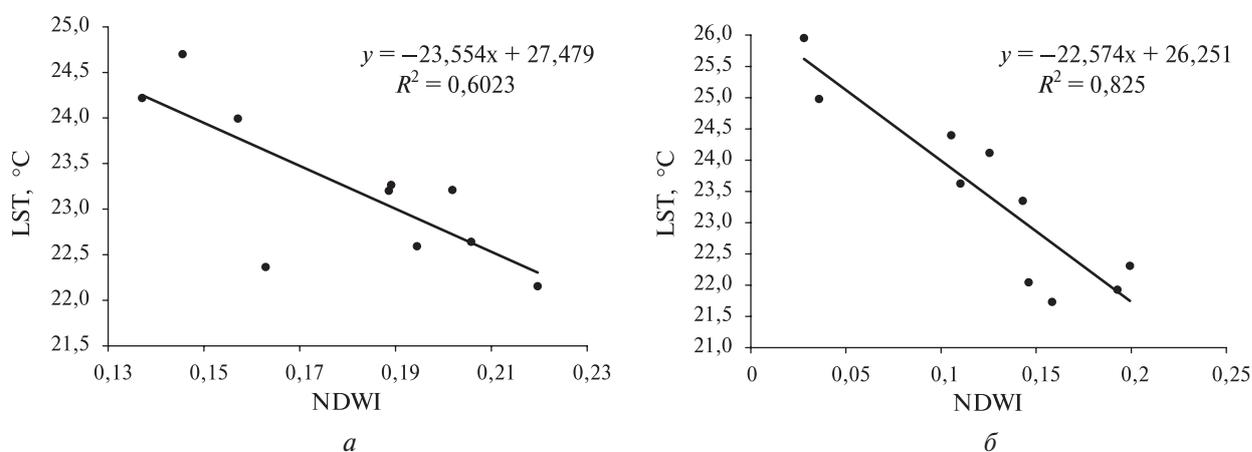


Рис. 8. Связь средних значений параметров LST и NDWI для районов Б (а) и В (б)

На гистограммах распределений (см. рис. 9) обозначены границы минимальной разности параметров, соответствующие двум среднеквадратическим отклонениям погрешности нормализации изображений 2020 г. (см. табл. 2). Цветовой тон на изображениях, характеризующий изменение параметров, соответствует модулю одного СКО нормализации. На рис. 9 (см. с. 120) также даны границы района В.

Известно, что многопараметрический анализ разновременных изображений позволяет характеризовать (идентифицировать) схожие трансформации поверхности. На рис. 10–12 (см. с. 121–122) приведены графики вариаций средних значений параметров, характеризующие типичные трансформации на выборочных участках (обозначены красными контурами) в границах района Б (см. рис. 9). Вертикальными планками на графиках обозначены значения среднеквадратического отклонения параметров, характеризующие их разброс в границах анализируемых участков. Участок № 1 приурочен к дренированным отложениям III морской террасы и на начальных этапах освоения претерпел существенные нарушения растительного покрова, в основном в результате разъездов гусеничного транспорта (Kumpula et al., 2012). В 1990 г. на этом участке отмечаются аномально высокие значения LST, аномально низкие значения NDWI, NDVI и относительно низкие значения альбедо (см. рис. 10), что в ряду имеющихся данных Landsat соответствует стадии максимальных нарушений покрова, после которой следует период его восстановления. Отсутствие данных за период с 1998 по 2009 г. (участки пунктирных линий на графиках) не позволяет восстановить более детальную картину динамики процессов, поэтому по характеру изменений параметров NDVI и Alb (см. рис. 10в, г) можно утверждать, что длительность восстановления покрова составляет не менее 10, но не более 20 лет. Увеличение объёма живой зелёной массы приводит к повышению транспирации и влажности покрова, что подтверждается снижением LST и ростом NDWI (см. рис. 10а, б). На рис. 9 участок № 1 также характеризуется аналогичными изменениями параметров за период с 1990 по 2020 г.

В 2012 г., после окончания строительства аэропорта, проведён спуск оз. Ямб-Малыто на участке № 2 (см. рис. 9). Многолетние вариации параметров в границах этого озера, а впоследствии хасырея, приведены на рис. 11. В 2013 г. дно хасырея представляло собой обнажённый грунт без какой-либо растительности, на что указывают аномально высокие средние значения LST, аномально низкие значения NDWI и значения NDVI = 0,1. Устойчивый растительный покров на дне хасырея сформировался не более чем через три года после спуска озера, о чём свидетельствуют снижение и стабилизация значений LST, а также повышение и стабилизация значений NDWI и NDVI.

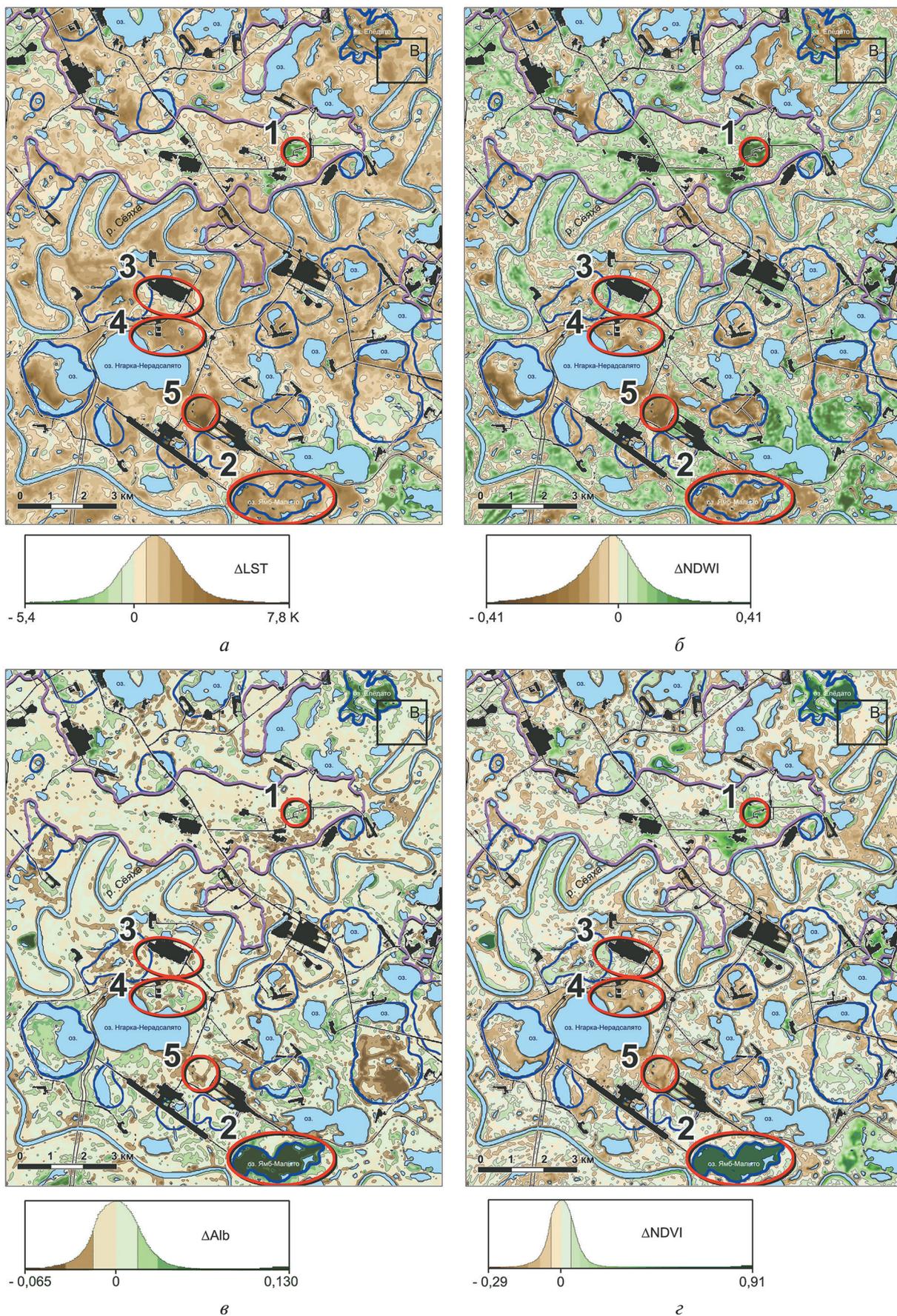


Рис. 9. Распределения разности значений параметров ΔLST (а), $\Delta NDWI$ (б), ΔAlb (в) и $\Delta NDVI$ (г) в районах Б и В по данным съёмки 1990 и 2020 гг.

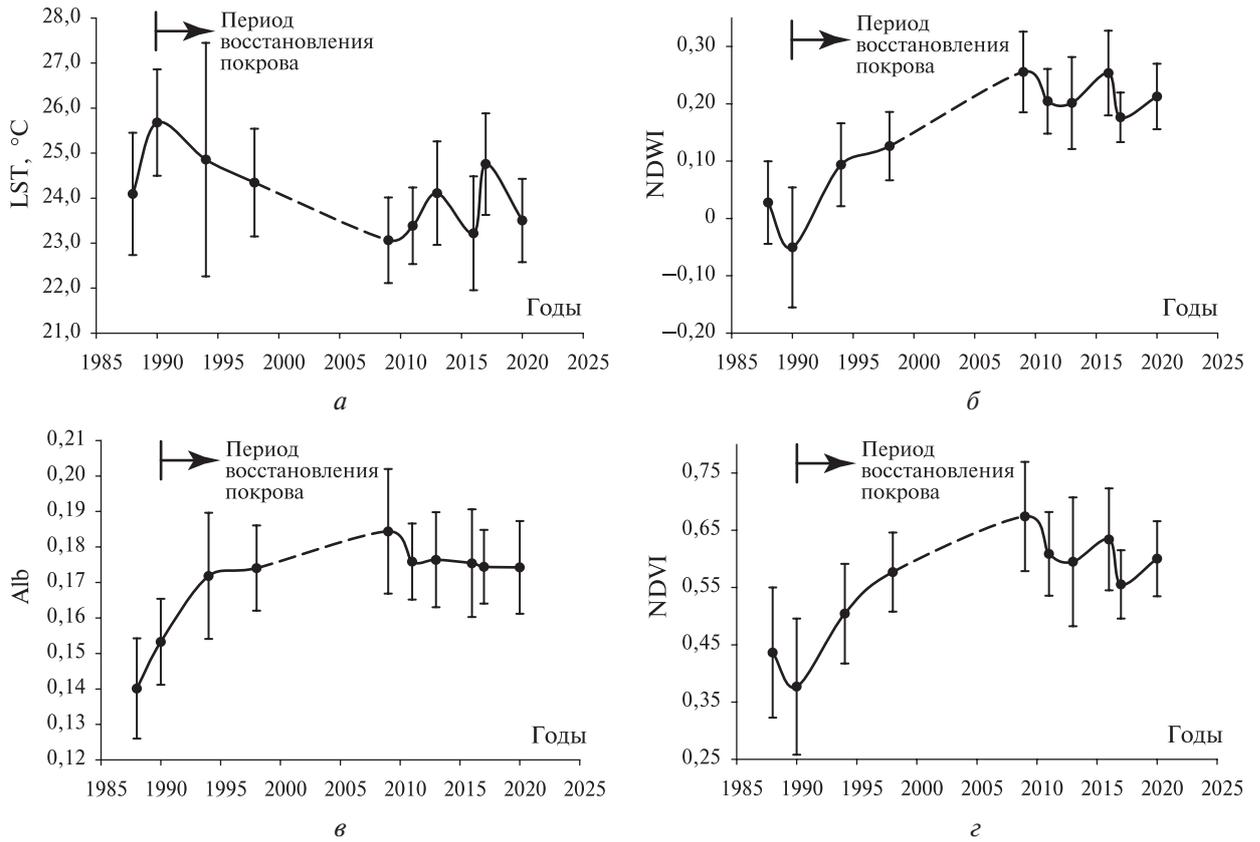


Рис. 10. Вариации средних значений параметров LST (а), NDWI (б), Alb (в) и NDVI (г) на участке № 1

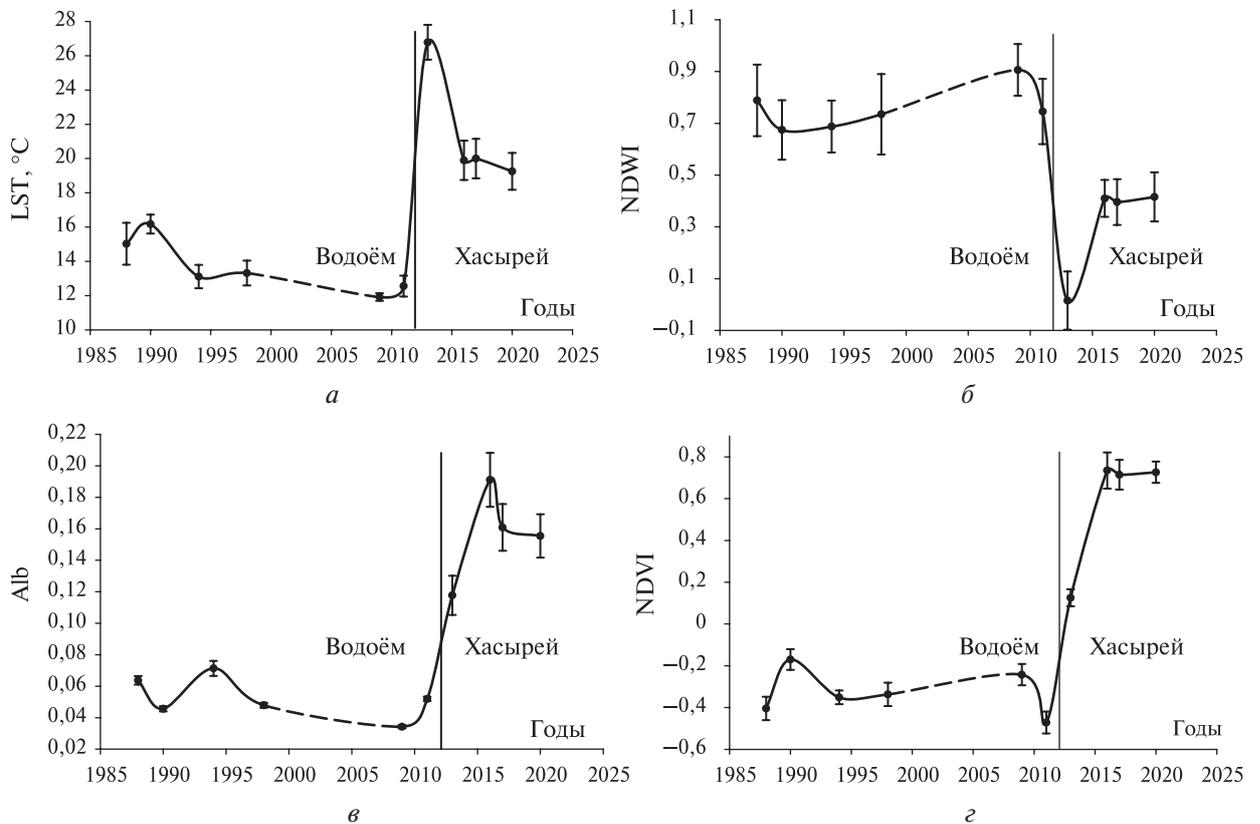


Рис. 11. Вариации средних значений параметров LST (а), NDWI (б), Alb (в) и NDVI (г) на участке № 2

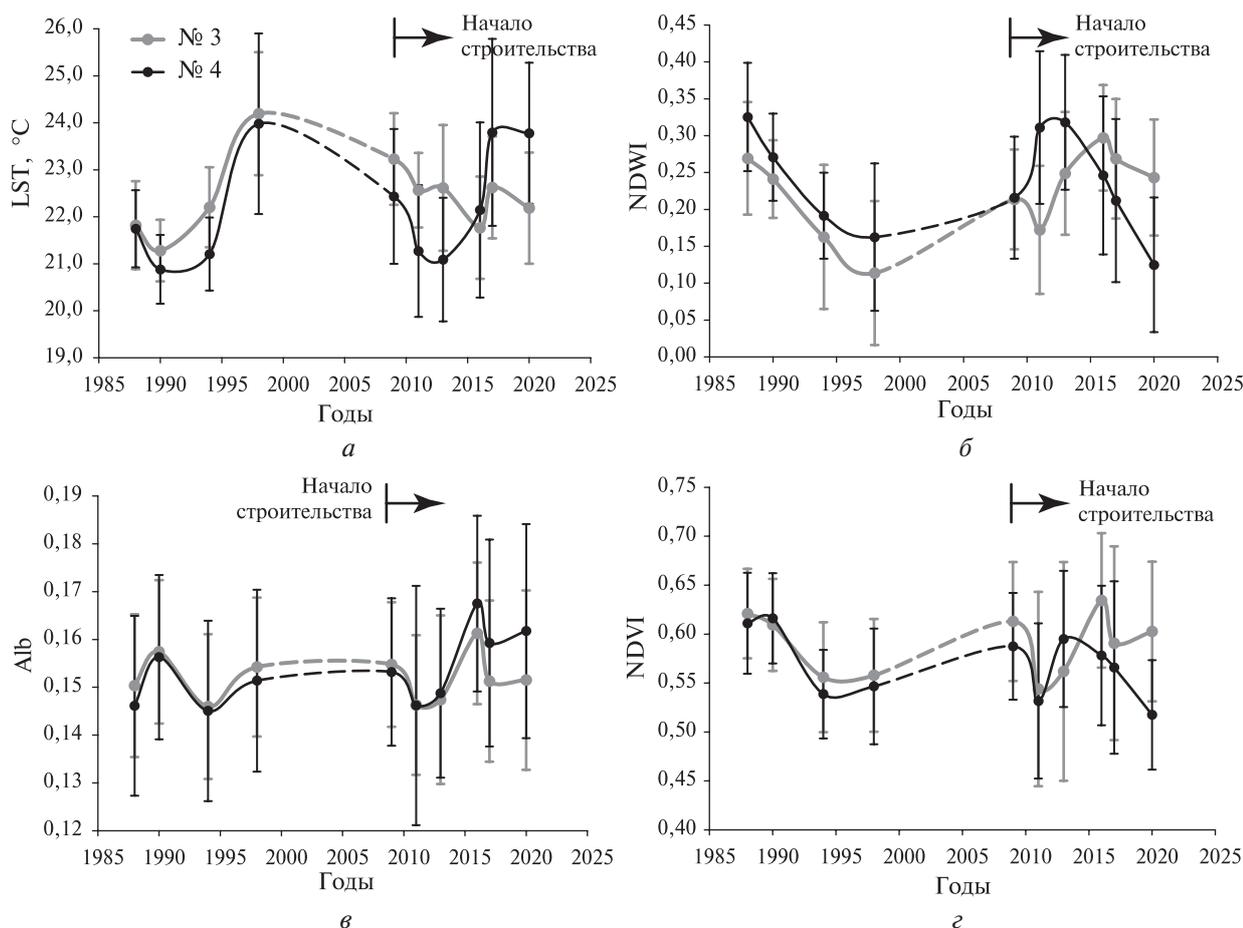


Рис. 12. Вариации средних значений параметров LST (а), NDWI (б), Alb (в) и NDVI (г) на участках № 3 и 4

Заращение дна здесь происходит с преимущественным формированием гигрофитных травяно-осоково-гипновых сообществ (Московченко, 2013). В границах хасырея за период с 1990 по 2020 г. распределения разности значений Alb, NDVI и LST положительные (см. рис. 9а, в, г), поскольку у воды альbedo, вегетационные индексы и температура в дневное время всегда ниже, чем у растительности. Распределение разности значений индекса NDWI, наоборот, отрицательное (см. рис. 9б), поскольку водная поверхность характеризуется аномально высокими значениями этого параметра. Аналогичные изменения параметров произошли в границах спущенного в 1994 г. оз. Елѣдато рядом с районом В (см. рис. 9). Изменения параметров в самом районе В (с исключением части хасырея) за период с 1990 по 2020 г. (см. рис. 9) также достаточно близки к общим трендам (см. рис. 7).

Существенное различие в скорости восстановления растительности на участках № 1 и 2 объясняется более высокой влажностью дна хасырея в пойменной части по сравнению с поверхностными отложениями дренированных водоразделов. Максимальные значения вегетационного индекса после восстановления покрова приблизительно одинаковы на обоих участках (NDVI = 0,65–0,70) (см. рис. 10г и 11г). В то же время максимальные значения индекса влажности на участке № 2 (NDWI = 0,40) (см. рис. 11б) существенно выше, чем на участке № 1 (NDWI = 0,25) (см. рис. 10б). Соответственно, минимальные значения LST после восстановления покрова на участке № 2 почти на 3 °C ниже, чем на участке № 1 (см. рис. 10а и 11а).

Приведѣнные примеры свидетельствуют о неслучайном характере вариаций параметров и о возможности анализа их изменений за любой период, в том числе после начала строительства объектов. В частности, на двух смежных участках № 3 и 4, расположенных в пойменной части района Б (см. рис. 9), строительство было начато в 2009 г. До этого года вариации средних значений параметров на этих участках были практически идентичны (см. рис. 12).

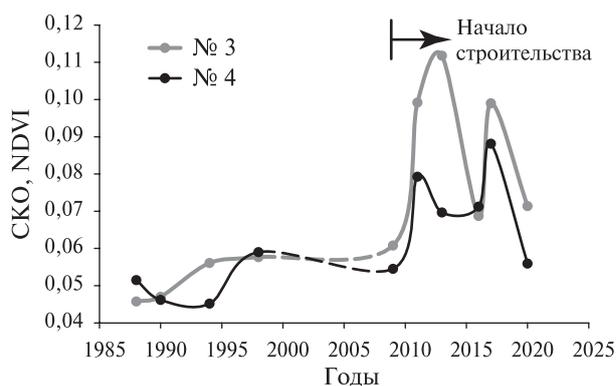


Рис. 13. Вариации СКО индекса NDVI на участках № 3 и 4

трансформаций ландшафта также может быть резкое повышение СКО индекса NDVI, вызванное локальными нарушениями однородности почвенного покрова (рис. 13).

На участке № 5 вблизи аэропорта отмечается аномальное повышение LST на 6–7 °С (см. рис. 9а) и аномальное снижение NDWI (см. рис. 9б), что также указывает на активизацию процессов дренирования пойменных болот на пересечении дорог после их строительства. Для данного типа поверхности дренирование приводит к незначительному снижению альбедо (см. рис. 9в) и вегетационного индекса NDVI (см. рис. 9г). Участки аналогичных изменений параметров LST и NDWI выявляются также вблизи других технических объектов и дорог (см. рис. 9).

Анализ полученных результатов показывает, что при трансформациях тундрового покрова связь между изменениями параметров LST, NDWI и NDVI практически однозначна, чего нельзя подтвердить в отношении связи между изменениями этих параметров и альбедо. Существенное влияние на вариации альбедо на разных участках может оказывать изменение доли открытых почв и грунтов (торф, пески, суглинки и др.), имеющих различную отражательную способность, а также влажность покрова и интенсивность испарения с его поверхности (Jacob et al., 2002).

Судя по распределениям разности параметров, их гистограммам и с учётом погрешностей нормализации, изменения LST и NDWI за период с 1990 по 2020 г. более существенны по сравнению с Alb и NDVI. Несмотря на достаточно близкое обратное соответствие аномальных значений ΔLST и $\Delta NDWI$, площадь территории повышения LST явно больше площади снижения NDWI (см. рис. 9а, б). В данном случае следует учитывать различные физические принципы, характеризующие связь параметров LST и NDWI с влажностью поверхности. Параметр LST чувствителен к эвапотранспирации и влажности почвенно-растительного покрова в слое суточных колебаний температуры, по толщине не превышающем первые десятки сантиметров (Schieldge et al., 1980). Индекс NDWI чувствителен к влаге только на поверхности покрова (Gao, 1996), концентрация которой зависит также от температуры и влажности атмосферного воздуха. Таким образом, можно предположить, что в данном случае преобладают процессы снижения влажности в почвенном субстрате и грунте, в том числе из-за изменения условий поверхностного стока в результате строительства объектов.

Заключение

В настоящей работе предпринята попытка оценить антропогенные (техногенные) трансформации криогенных ландшафтов в районе Бованенковского НГКМ за период с 1988 по 2020 г. на основе параметров LST, NDWI, Alb и NDVI, рассчитываемых по данным спутников Landsat. Анализ трендов средних значений параметров проводился с использованием методики относительной радиометрической нормализации временного ряда мультиспектральных

космических снимков. Определение коэффициентов уравнений для нормализации изображений и оценка погрешностей проводились с использованием метода *K*-блочной перекрёстной проверки в границах так называемых псевдо-инвариантных областей, характеризующих участки стабильного состояния поверхности.

В границах района, максимально охватывающего все построенные к 2020 г. объекты, тренды изменения параметров незначительные (незначимы). В районе наиболее длительной техногенной нагрузки (на южном своде месторождения) отмечается более явный рост средних значений температуры (LST) и снижение индекса влажности (NDWI), что свидетельствует о преобладании процессов дренирования поверхности, преимущественно в пойменной части. В районе Бованенковского НГКМ климатический тренд роста среднегодовой температуры воздуха составляет 0,05 °С/год, и с этим связывается увеличение глубины деятельного слоя с трендом 1,5 см/год (Ardelean et al., 2020). Повышение температуры поверхности и дренирование осваиваемых территорий на фоне глобальных климатических трендов может стать дополнительным фактором увеличения глубины сезонно-талого слоя (O'Donnell et al., 2009). На участках с близким залеганием к поверхности пластовых льдов, в основном на водоразделах, это может привести к активизации термокарста и термоэрозии. При дренировании пойменных болот и увеличении глубины талого слоя деградация мерзлоты приводит к росту эмиссии биогенных газов.

В целом полученные результаты позволяют предположить, что по параметрам LST, NDWI, Alb и NDVI за период с 1988 по 2020 г. не фиксируются какие-либо значимые доминирующие тенденции изменения криогенных ландшафтов за границами участков расположения промышленных и инфраструктурных объектов Бованенковского месторождения. Антропогенное воздействие здесь носит локальный характер и в основном выражается в усилении процессов дренирования поверхности вблизи технических объектов, что может быть более благоприятным следствием работ, направленных на обеспечение их безопасности, по сравнению с переувлажнением и подтоплением территорий. Незначительные общие тенденции изменения биофизических характеристик поверхности в районе Бованенковского НГКМ на данном этапе могут свидетельствовать об относительной стабильности состояния ландшафтов и эффективности геотехнических и экологических мероприятий, проводимых при строительстве и эксплуатации объектов в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород и высокой льдистости грунтов. Полученные результаты могут быть приняты во внимание при изучении, характеристике и картографическом моделировании изменений биофизических параметров поверхности на различных стадиях трансформации криогенных ландшафтов.

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

Литература

1. *Воронцов К. В.* Комбинаторный подход к оценке качества обучаемых алгоритмов // Математ. вопросы кибернетики. 2004. Вып. 13. С. 5–36. URL: <http://library.keldysh.ru/mvk.asp?id=2004-5>.
2. *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.
3. *Кадничанский С. А.* Оценка контраста цифровых аэрофото- и космических снимков // Геодезия и картография. 2018. № 3. С. 46–51. DOI: 10.22389/0016-7126-2018-933-3-46-51.
4. *Конищев В. Н.* Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5: «География». 2009. № 4. С. 10–20.
5. *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. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-30.art6.

6. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. В 3-х т. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / под ред. Ю. Б. Баду, Н. А. Гафарова, Е. Е. Подборного. М.: ООО «Газпром ЭКСПО», 2013. 422 с.
7. Крицук Л. Н., Дубровин В. А. Карты геокриологического районирования как основа геоэкологической оценки осваиваемой территории криолитозоны // Разведка и охрана недр. 2003. № 7. С. 12–15.
8. 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.
9. Морозова Л. М., Магомедова М. А. Структура растительного покрова и растительные ресурсы полуострова Ямал. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2004. 63 с.
10. Москвиченко Д. В. Особенности многолетней динамики растительности Бованенковского месторождения (полуостров Ямал) // Вестн. Тюменского гос. ун-та. 2013. № 12. С. 57–66.
11. Туткова Т. Б., Виноградова В. В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86.
12. 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.
13. 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.
14. Beck P.S.A., Goetz S.J. Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: ecological variability and regional differences // Environmental Research Letters. 2011. V. 6. No. 4. Art. No. 045501. 10 p. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/049501>.
15. Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Bieniek P.A., Epstein H.E., Comiso J.C., Pinzon J.E., Tucker C.J., Steele M., Ermold W., Zhang J. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environmental Research Letters. 2017. V. 12. No. 5. Art. No. 055003. 17 p. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b0b>.
16. 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>.
17. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. P. 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>.
18. 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.
19. Holloway J. E., Lewkowicz A. G., Douglas T. A., Li X., Turetsky M. R., Baltzer J. L., Jin H. Impact of wildfire on permafrost landscapes: A review of recent advances and future prospects // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. V. 31. No. 3. P. 371–382. <https://doi.org/10.1002/ppp.2048>.
20. 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.
21. Kim T., Han Y. Integrated Preprocessing of Multitemporal Very-High-Resolution Satellite Images via Conjugate Points-Based Pseudo-Invariant Feature Extraction // Remote Sensing. 2021. V. 13. Art. No. 3990. <https://doi.org/10.3390/rs13193990>.
22. Kornienko S. G. Radiometric normalization of Landsat thermal imagery for detection of tundra land cover changes: experience from West Siberia // Intern. J. Remote Sensing. 2021. V. 42. No. 4. P. 1420–1449. DOI: 10.1080/01431161.2020.1832280.
23. 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. V. 4. No. 4. P. 1046–1068. DOI: 10.3390/rs4041046.
24. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Version 5.0. USGS. Department of the Interior. Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019. 114 p. URL: https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook-v5.0.pdf.
25. 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.
26. Mann H. B. Nonparametric tests against trend // Econometrica. 1945. V. 13. P. 245–259.
27. Marcot B. G., Hanea A. M. What is an optimal value of k in k-fold cross-validation in discrete Bayesian network analysis? // Computational Statistics. 2021. V. 36. P. 2009–2031. <https://doi.org/10.1007/s00180-020-00999-9>.

28. 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.
29. Piralilou S.T., Einali G., Ghorbanzadeh O., Nachappa T.G., Gholamnia K., Blaschke T., Ghamisi P.A. Google Earth Engine Approach for Wildfire Susceptibility Prediction Fusion with Remote Sensing Data of Different Spatial Resolutions // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Art. No. 672. <https://doi.org/10.3390/rs14030672>.
30. 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. V. 6. P. 11810–11828. <https://doi.org/10.3390/rs61211810>.
31. 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>.
32. Scheidt S., Ramsey M., Lancaster N. Radiometric normalization and image mosaic generation of ASTER thermal infrared data: An application to extensive sand sheets and dune fields // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. No. 3. P. 920–933. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.020>.
33. 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. V. 238. P. 350–357.
34. Schott J.R., Salvaggio C., Vochok W.J. Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features // *Remote Sensing of Environment*. 1988. V. 26. No. 1. P. 1–14. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90116-2).
35. Sun Y., Gao C., Li J., Wang R., Liu J. Quantifying the Effects of Urban Form on Land Surface Temperature in Subtropical High-Density Urban Areas Using Machine Learning // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Art. No. 959. DOI: 10.3390/rs11080959.
36. 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.
37. Urban M., Forkel M., Eberle J., Hüttich C., Schmullius C., Herold M. Pan-Arctic climate and land cover trends derived from multi-variate and multi-scale analyses (1981–2012) // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. P. 2296–2316. DOI: 10.3390/rs6032296.
38. Van de Griend A.A., Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized different vegetation index for natural surfaces // *Intern. J. Remote Sensing*. 1993. V. 14. No. 6. P. 1119–1131. DOI: 10.1080/01431169308904400.
39. 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.
40. 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.
41. Xu H., Wei Y., Li X., Zhao Y., Cheng Q. A novel automatic method on pseudo-invariant features extraction for enhancing the relative radiometric normalization of high-resolution images // *Intern. J. Remote Sensing*. 2021. V. 42. P. 6153–6183. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1934912>.
42. 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>.
43. Yuan D., Elvidge C.D. Comparison of relative radiometric normalization techniques // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 1996. V. 51. P. 117–126.

Characteristics of anthropogenic transformations of landscapes in the area of Bovanenkovo 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 results of the assessment of transformations of natural landscapes of the permafrost zone in the area of construction and operation of technical facilities of the Bovanenkovo oil-gas-condensate field on the Yamal Peninsula are presented. The study was conducted using 10 Landsat satellite images of summer surveys from 1988 to 2020 based on parameters characterizing the noon-time mean land surface temperature (LST), albedo (Alb), chlorophyll content (NDVI index), and moisture (NDWI index) of the ground cover. Analysis of long-term trends of mean values of LST parameters, Alb, NDVI, and NDWI to assess the influence of anthropogenic factors on the background of global and regional changes was conducted using the technique of relative radiometric normalization of the time series of multispectral space images. The coefficients of the equations for image transformation and normalization errors were determined based on the cross-validation method. The significance of the trends was assessed using the nonparametric Mann-Kendall test. The informativity of the LST, Alb, NDVI and NDWI parameters for characterizing landscape transformations was confirmed by assessing vegetation changes using the 2004 and 2016 ultra-high spatial resolution satellite images. Within the boundaries of the plot covering all facilities built by 2020, the trends are insignificant. In the local area of the longest technogenic load (on the southern arch of the field), there is a more evident (significant) LST growth and reduction of NDWI, indicating the dominance of surface drainage processes. Trends of Alb and NDVI are insignificant in this area, indicating no trends in vegetation cover changes associated with anthropogenic impact. It is noted that the observed increase in surface temperature against the background of the observed global climatic trend may be an additional factor in increase in the depth of the active layer and permafrost degradation. It is concluded that changes in LST, Alb, NDVI, and NDWI parameters characterizing transformations of natural landscapes are not recorded beyond the boundaries of industrial and infrastructure sites.

Keywords: anthropogenic impact, remote sensing, cryogenic landscape, radiometric normalization, cross-validation, surface temperature, albedo, NDVI, NDWI, transformations, tundra, Bovanenkovo gas field

Accepted: 11.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129

References

1. Vorontsov K. V., Combinatorial approach to assessing the quality of learning algorithms, *Matematicheskie voprosy kibernetiki*, 2004, Vyp. 13, pp. 5–36 (in Russian), available at: <http://library.keldysh.ru/mvk.asp?id=2004-5>.
2. 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.
3. Kadnichanskii S. A., Contrast evaluation of digital aerial and satellite images, *Geodeziya i kartografiya*, 2018, No. 3, pp. 46–51 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2018-933-3-46-5.
4. Konishchev V. N., Response of permafrost to climate warming, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya*, 2009, No. 4, pp. 10–20 (in Russian).
5. 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, *Aktual'nye problemy nefti i gaza*, 2020, Vyp. 3(30), pp. 51–63 (in Russian), DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-30.art6.
6. *Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdenii poluostrova Yamal, V 3 t., T. 2, Kriosfera Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya* (Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula, In 3 vol., Vol. 2, Cryosphere of the Bovanenkovo oil and gas condensate field), Yu. B. Badu, N. A. Gafarov, E. E. Podbornyi (eds.), Moscow: OOO “Gazprom EKSP0”, 2013, 422 p. (in Russian).
7. Kritsuk L. N., Dubrovin V. A., Maps of geocryological zoning as the basis of the geoecological assessment of the developed territory of the permafrost zone, *Razvedka i okhrana nedr*, 2003, No. 7, pp. 12–15 (in Russian).

8. 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.
9. Morozova L. M., Magomedova M. A., *Struktura rastitel'nogo pokrova i rastitel'nye resursy poluostrova Yamal* (Land cover structure and plant resources of the Yamal Peninsula), Ekaterinburg: Izd. Uralskogo universiteta, 2004, 63 p. (in Russian).
10. Moskovchenko D. V., Peculiarities of long-term dynamics of vegetation at the Bovanenkovskoye field (Yamal Peninsula), *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, No. 12, pp. 57–66 (in Russian).
11. Titkova T. B., Vinogradova V. V., The response of vegetation to climate change in boreal and subarctic landscapes at the beginning of XXI century, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 75–86 (in Russian).
12. Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Vaisfel'd M. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Tertitskii 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.
13. 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.
14. Beck P. S. A., Goetz S. J., Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: ecological variability and regional differences, *Environmental Research Letters*, 2011, Vol. 6, No. 4, Art. No. 045501, 10 p., <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/049501>.
15. Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K., Bieniek P. A., Epstein H. E., Comiso J. C., Pinzon J. E., Tucker C. J., Steele M., Ermold W., Zhang J., Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables, *Environmental Research Letters*, 2017, Vol. 12, No. 5, Art. No. 055003, 17 p., <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b0b>.
16. 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>.
17. Chander G., Markham B. L., Helder D. L., Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, pp. 893–903, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>.
18. 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.
19. Holloway J. E., Lewkowicz A. G., Douglas T. A., Li X., Turetsky M. R., Baltzer J. L., Jin H., Impact of wildfire on permafrost landscapes: A review of recent advances and future prospects, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, Vol. 31, No. 3, pp. 371–382, <https://doi.org/10.1002/ppp.2048>.
20. 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.
21. Kim T., Han Y., Integrated Preprocessing of Multitemporal Very-High-Resolution Satellite Images via Conjugate Points-Based Pseudo-Invariant Feature Extraction, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Art. No. 3990, <https://doi.org/10.3390/rs13193990>.
22. Kornienko S. G., Radiometric normalization of Landsat thermal imagery for detection of tundra land cover changes: experience from West Siberia, *Intern. J. Remote Sensing*, 2021, Vol. 42, No. 4, pp. 1420–1449, DOI: 10.1080/01431161.2020.1832280.
23. 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, pp. 1046–1068, DOI: 10.3390/rs4041046.
24. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Version 5.0*, USGS, Department of the Interior, Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019, 114 p., available at: https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook-v5.0.pdf.
25. 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.
26. Mann H. B., Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 1945, Vol. 13, pp. 245–259.
27. Marcot B. G., Hanea A. M., What is an optimal value of k in k-fold cross-validation in discrete Bayesian network analysis? *Computational Statistics*, 2021, Vol. 36, pp. 2009–2031, <https://doi.org/10.1007/s00180-020-00999-9>.
28. 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.

29. Piralilou S. T., Einali G., Ghorbanzadeh O., Nachappa T. G., Gholamnia K., Blaschke T., Ghamisi P. A., Google Earth Engine Approach for Wildfire Susceptibility Prediction Fusion with Remote Sensing Data of Different Spatial Resolutions, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Art. No. 672, <https://doi.org/10.3390/rs14030672>.
30. 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, <https://doi.org/10.3390/rs61211810>.
31. 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, Vol. 106, pp. 82–94, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.05.002>.
32. Scheidt S., Ramsey M., Lancaster N., Radiometric normalization and image mosaic generation of ASTER thermal infrared data: An application to extensive sand sheets and dune fields, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 3, pp. 920–933, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.020>.
33. 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.
34. Schott J. R., Salvaggio C., Vochok W. J., Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features, *Remote Sensing of Environment*, 1988, Vol. 26, No. 1, pp. 1–14, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90116-2).
35. Sun Y., Gao C., Li J., Wang R., Liu J., Quantifying the Effects of Urban Form on Land Surface Temperature in Subtropical High-Density Urban Areas Using Machine Learning, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Art. No. 959, DOI: 10.3390/rs11080959.
36. 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.
37. Urban M., Forkel M., Eberle J., Hüttich C., Schmullius C., Herold M., Pan-Arctic climate and land cover trends derived from multi-variate and multi-scale analyses (1981–2012), *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 2296–2316, DOI: 10.3390/rs6032296.
38. Van de Griend A. A., Owe M., On the relationship between thermal emissivity and the normalized different vegetation index for natural surfaces, *Intern. J. Remote Sensing*, 1993, Vol. 14, No. 6, pp. 1119–1131, DOI: 10.1080/01431169308904400.
39. 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.
40. 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.
41. Xu H., Wei Y., Li X., Zhao Y., Cheng Q., A novel automatic method on pseudo-invariant features extraction for enhancing the relative radiometric normalization of high-resolution images, *Intern. J. Remote Sensing*, 2021, Vol. 42, pp. 6153–6183, <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1934912>.
42. 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, Art. No. 124020, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124020>.
43. Yuan D., Elvidge C. D., Comparison of relative radiometric normalization techniques, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, Vol. 51, pp. 117–126.