

Опыт использования снимков со спутников Landsat для характеристики трансформаций напочвенного покрова на участке «Бованенково–Байдарацкая Губа» трассы магистрального газопровода «Бованенково–Ухта»

С.Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия

E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Аннотация. На примере участка трассы «Бованенково–Байдарацкая Губа» двух подземных магистральных газопроводов, расположенных на полуострове Ямал, показана возможность использования снимков со спутников Landsat 5 и Landsat 8 для характеристики трансформаций напочвенного покрова, связанных с прокладкой трубопроводов. Исследования проводились с использованием семи снимков летнего времени (июль, август) за период с 2009 по 2020 гг. на основе параметров, характеризующих содержание хлорофилла в растительном покрове – вегетационного индекса NDVI, индекса влажности NDWI и альbedo (Alb) поверхности. В год укладки трубопроводов непосредственно над ними средние значения данных параметров резко снижаются, а через 5–7 лет значения индексов NDVI и NDWI стабилизируются до начальных величин. За этот же период средние значения альbedo повышаются на 13–15% относительно начального уровня. По анализируемым параметрам признаки нарушения и восстановления напочвенного растительного покрова не фиксируются на расстоянии более 70–90 м от центральной оси каждого из трубопроводов. В целом, к концу анализируемого периода не наблюдаются какие-либо доминирующие тенденции изменения вегетационного индекса, влажности и альbedo, свидетельствующие о трансформациях биофизических свойств поверхности, при которых повышается вероятность деградации многолетней мерзлоты и дестабилизации состояния трубопроводов.

Ключевые слова: мониторинг, магистральный газопровод, Landsat, альbedo, индекс NDVI, индекс NDWI, тундра, трансформация напочвенного покрова.

Для цитирования: Корниенко С.Г. Опыт использования снимков со спутников Landsat для характеристики трансформаций напочвенного покрова на участке «Бованенково–Байдарацкая Губа» трассы магистрального газопровода «Бованенково–Ухта» // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. Вып. 4(39). С. 126–147. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-39.art10>

Введение

В районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород и высокой льдистости грунтов изменение состояния напочвенного растительного покрова вблизи технических объектов может стать причиной развития опасных геокриологических процессов [1]. Строительство магистральных газопроводов (МГ) может повлиять на состояние растительного покрова, изменить условия поверхностного стока, вследствие чего возможно переувлажнение или

дренирование поверхностного слоя грунтов, изменение глубины сезонно-талого слоя, образование подтоплений, термокарста, термоэрозии, мерзлотного пучения или развитие дефляционных процессов.

Вероятность возникновения подобных опасных геокриологических процессов (ОГП) анализируется и предусматривается на стадиях проектирования и строительства с учетом особенностей ландшафта, мерзлотных и гидрологических условий.

В тоже время остаются актуальными мероприятия, касающиеся мониторинга трасс МГ, в том числе исследование доминирующих тенденций изменения состояния поверхности, длительности восстановления покрова непосредственно над трубопроводами и примыкающими к ним участкам, которые также называют буферными зонами [2]. Учитывая протяженность и удаленность северных МГ от населенных пунктов, для контроля их состояния перспективно применение материалов аэро- и космической съемки.

В работах [3–5] рассматриваются примеры использования разновременных космических снимков различного пространственного разрешения, в том числе снимков Landsat для оценки влияния объектов нефтегазового комплекса на изменение состояния природных ландшафтов криолитозоны. На примере отдельного участка была предпринята попытка оценить влияние линейных сооружений (дорог, трубопроводов) и производственных объектов на состояние ландшафтов в зоне прерывистой вечной мерзлоты с использованием снимков со спутников Landsat, а также снимков высокого пространственного разрешения со спутников Corona и QuickBird [2]. Однако методики анализа временных рядов данных космической съемки, используемые в работах [2–5], не позволяют оценить антропогенную составляющую воздействия на ландшафт с исключением или минимизацией влияния природных факторов, в частности климатического тренда потепления. При изучении многолетних вариаций параметров, рассчитанных по данным космической съемки оценка влияния только антропогенных факторов, как правило, не рассматривается

исследователями, поскольку представляет собой достаточно сложную задачу. Тем не менее, проблема эта актуальна, поскольку степень антропогенного воздействия и реакция на него природной среды могут быть разными, что следует учитывать при прогнозировании развития ОГП, а также при планировании мероприятий по обеспечению экологической и промышленной безопасности при освоении нефтегазовых месторождений в районах распространения многолетнемерзлых пород.

Цель настоящей работы – оценка информативности снимков со спутников Landsat для характеристики доминирующих тенденций изменения напочвенного растительного покрова в тундровой зоне, связанных со строительством участка трассы магистрального газопровода «Бованенково–Байдарацкая Губа».

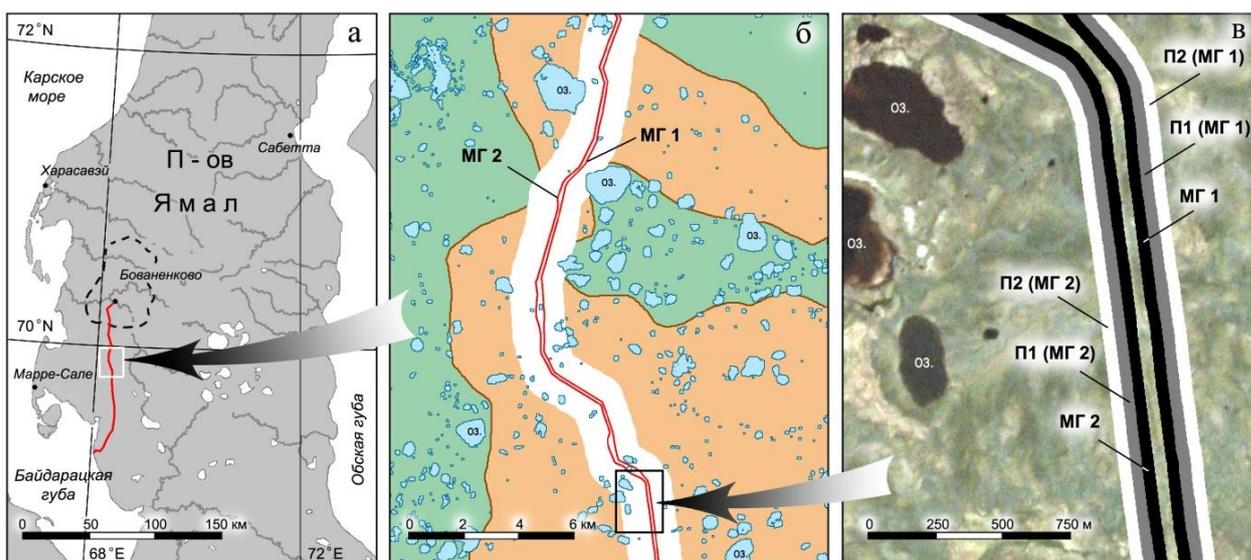
Характеристика района и объектов исследований

Участок «Бованенково–Байдарацкая Губа» протяженностью около 80 км расположен в юго-западной части полуострова Ямал и составляет самый северный сегмент магистрального газопровода «Бованенково–Ухта» (рис. 1а). Две нитки газопровода проложены от промыслов Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения до подводной части, проходящей по дну Байдарацкой Губы. Строительство первой нитки газопровода (МГ1) было начато в 2008–2009 г., а в 2012 году, вместе с пуском в эксплуатацию первой очереди Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), по ней был пущен первый газ. Строительство второй нитки (МГ2) было начато в 2012 г., а в 2017 г. она была запущена в эксплуатацию.

Район прохождения трассы газопровода относится к субарктическим тундрам (подзона типичных тундр) со сплошным распространением многолетнемерзлых пород и залегающими близко к поверхности пластовыми льдами [6, 7]. Район относится к равнинным территориям с относительно плоским рельефом, густой сетью рек, большим количеством болот и озер преимущественно термокарстового происхождения. Низкорослый напочвенный растительный покров толщиной от 2 до 15 см включает кустарничковые, моховые, травяные и лишайниковые виды [8]. Глубина сезонно-талого слоя не превышает 1 м.

Для снижения рисков развития деформационных процессов трубы диаметром 1420 мм проложены в мерзлом грунте на глубине 4–5 м, что при охлаждении газа до -2 C приводит к их смерзанию с грунтом.

Тестовый район исследований размерами 16×20 км выбран в центральной части трассы МГ (рис. 1а) и в геоморфологическом плане представлен III и IV морскими террасами [9, 10, 11] (рис. 1б). В границах тестового района трасса газопровода проходит по участкам, относящимся к IV морской террасе, с преимущественно крупнохолмистым типом местности [9, 11].



Условные обозначения:

- | | | | |
|---|--|---|---|
|  | – контур Бованенковского НГКМ |  | – III терраса |
|  | – водные объекты |  | – IV терраса |
|  | – трасса магистрального газопровода |  | – обозначения полос анализа изменений напочвенного покрова вдоль трассы газопровода |
|  | – полосы анализа изменений напочвенного покрова вдоль трассы газопровода | | |

Рис. 1. Схемы расположения:

- а – участка «Бованенково–Байдарацкая Губа» трассы МГ (п-ов Ямал);
- б – района анализа изменений напочвенного покрова вдоль трассы МГ;
- в – участка трассы МГ, анализируемого по космическим снимкам высокого пространственного разрешения со спутников GeoEye-1 (30.07.2010 г.) и PlanetScope (23.07.2017 г.)

В настоящей работе к объектам исследований отнесены полосы шириной 45 м, захватывающие поверхности непосредственно над погребенными трубопроводами, а также полосы шириной по 45 м, проходящие рядом с ними (буферные зоны). На рис. 1в приведен фрагмент схемы расположения полос наблюдений МГ1 и МГ2 непосредственно над нитками газопровода, полос буферной зоны П1(МГ1) и П2(МГ1), относящихся к первой нитке, а также полос П1(МГ2) и П2(МГ2), проходящих вдоль второй нитки. Расстояние между центрами погребенных трубопроводов порядка 100 м, на отдельных участках больше. Участок

между полосами МГ1 и МГ2 не анализировался (рис. 1в).

Наиболее существенные нарушения поверхности в полосах МГ1 и МГ2 связаны с выемкой грунта, образованием отвалов, а в ряде случаев – с возникновением локальных размывов, подтоплений и эрозионных каналов (просадок) грунта вдоль обваловочной насыпи (рис. 2). В полосах буферной зоны нарушения поверхности, связаны с проездами гусеничной техники. К наиболее проблемным участкам относятся переходы через реки, где мерзлота отсутствует, что повышает вероятность всплытия трубопроводов.

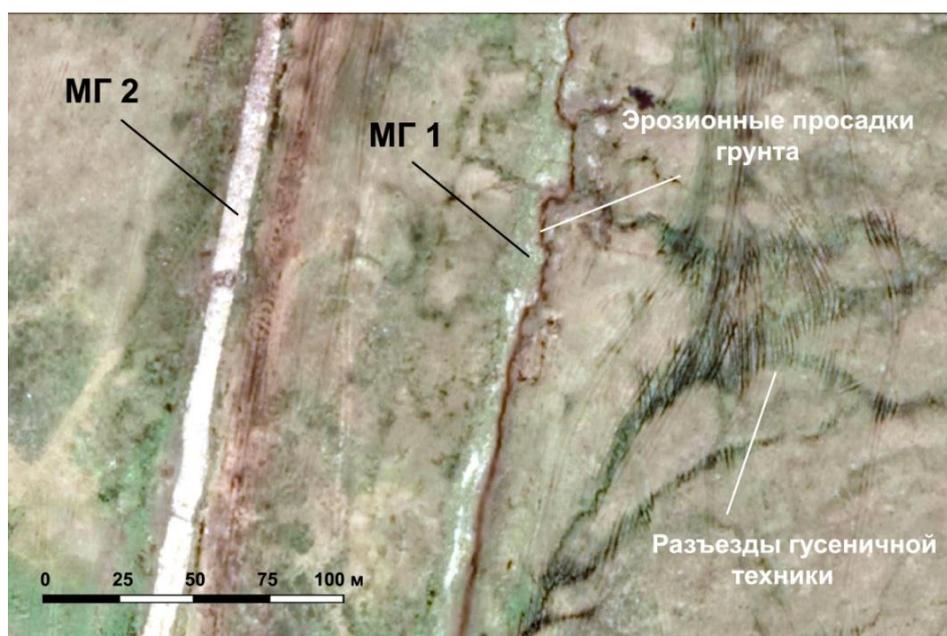


Рис. 2. Фрагмент космического снимка высокого разрешения (Maxar Technologies) участка трассы МГ «Бованенково–Байдарацкая Губа» 27.06.2016 г. [12] на участке «Бованенково–Байдарацкая Губа» трассы МГ

Исходные данные и методика исследований

Для анализа изменений состояния поверхности вдоль трассы газопровода использовалось 7 мультиспектральных снимков со спутников Landsat 5, 8 (табл. 1), находящиеся в открытом доступе и

полученные с ресурса Геологической службы США [13]. Дополнительно использовались мультиспектральные космические снимки высокого пространственного разрешения (КСВР) со спутников GeoEye-1 и PlanetScope (табл. 2), предоставленные компанией «Совзонд».

Таблица 1

Характеристика используемых в работе снимков со спутников Landsat

Спутники	Дата съемки	Местное время съемки	Кадр (Path; Row)
Landsat 5	25.08.2009	12 ч. 06 мин.	167, 11
Landsat 5	14.07.2011	12 ч. 06 мин.	167, 11
Landsat 8	19.07.2013	12 ч. 19 мин.	167, 11
Landsat 8	22.07.2014	12 ч. 16 мин.	167, 11
Landsat 8	20.07.2016	12 ч. 10 мин.	166, 11
Landsat 8	23.07.2017	12 ч. 10 мин.	166, 11
Landsat 8	22.07.2020	12 ч. 17 мин.	167, 11

Таблица 2

Характеристика используемых в работе космических снимков высокого пространственного разрешения

Спутники	Дата съемки	Время съемки	Спектральные диапазоны (мкм)
GeoEye-1	30.07.2010	12 ч. 13 мин.	0,45–0,52 (синий) 0,52–0,60 (зеленый) 0,625–0,795 (красный) 0,76–0,90 (ближний ИК)
PlanetScope	23.07.2017	11 ч. 23 мин.	0,455–0,515 (синий) 0,50–0,59 (зеленый) 0,59–0,67 (красный) 0,78–0,86 (ближний ИК)

На стадии предварительной обработки снимков со спутников Landsat с использованием программного комплекса ENVI 5.3 проводилась калибровка спектральных каналов, увеличение частоты дискретизации изображений (до 15 м на пиксел), а также формирование фрагментов на исследуемый район (см. рис. 16).

Для характеристики биофизических свойств напочвенного покрова по данным спутников Landsat рассчитывался вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [14], индекс влажности NDWI (Normalized Difference Water Index) поверхности [15] и коротковолновое альbedo (Alb) [16] поверхности. Для маскирования водных поверхностей использовался спектральный индекс MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) [17]. После обработки изображения по каждому из параметров имели пространственное разрешение 30 м, соответствующее разрешению используемых

исходных изображений в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах.

Вегетационный индекс NDVI зависит от содержания хлорофилла в напочвенном растительном покрове и широко применяется для изучения состояния растительности тундровой зоны [18–22]. Индекс NDWI используется для характеристики влажности (водной пленки) на поверхности покрова [15]. В большинстве случаев эти два параметра взаимосвязаны, поскольку влажность на поверхности покрова зависит от объема живой зеленой массы растительности. Коротковолновое альbedo (Alb) служит индикатором степени отражения солнечного излучения и позволяет судить об интенсивности испарения с поверхности и/или поглощения радиации [23]. Комплексная интерпретация параметров NDVI, NDWI и Alb позволяет более достоверно характеризовать тип трансформации напочвенного растительного покрова.

Положение трубопроводов определялось на основе классифицированных RGB (Red, Green, Blue) изображений, построенных с использованием 5, 4, 3-х спектральных каналов Landsat 5 и 6, 5, 4-х каналов Landsat 8 (рис. 3). Спектральные характеристики нарушенной поверхности, включающей открытый грунт для засыпки и обвалования трубопроводов, существенно отличаются от характеристик ненарушенного почвенного покрова, что, проявляется на RGB изображениях.

Наиболее контрастно участки нарушений поверхности, включающие открытый грунт, выделяются на RGB изображениях в годы укладки трубопроводов, когда еще нет новой живой растительности. Так, в данном случае, на RGB изображении 2011 года съемки участки нарушений поверхности над первым газопроводом (МГ1) проявляются малиновым цветом на фоне других цветов, характеризующих ненарушенную поверхность (рис. 3а).

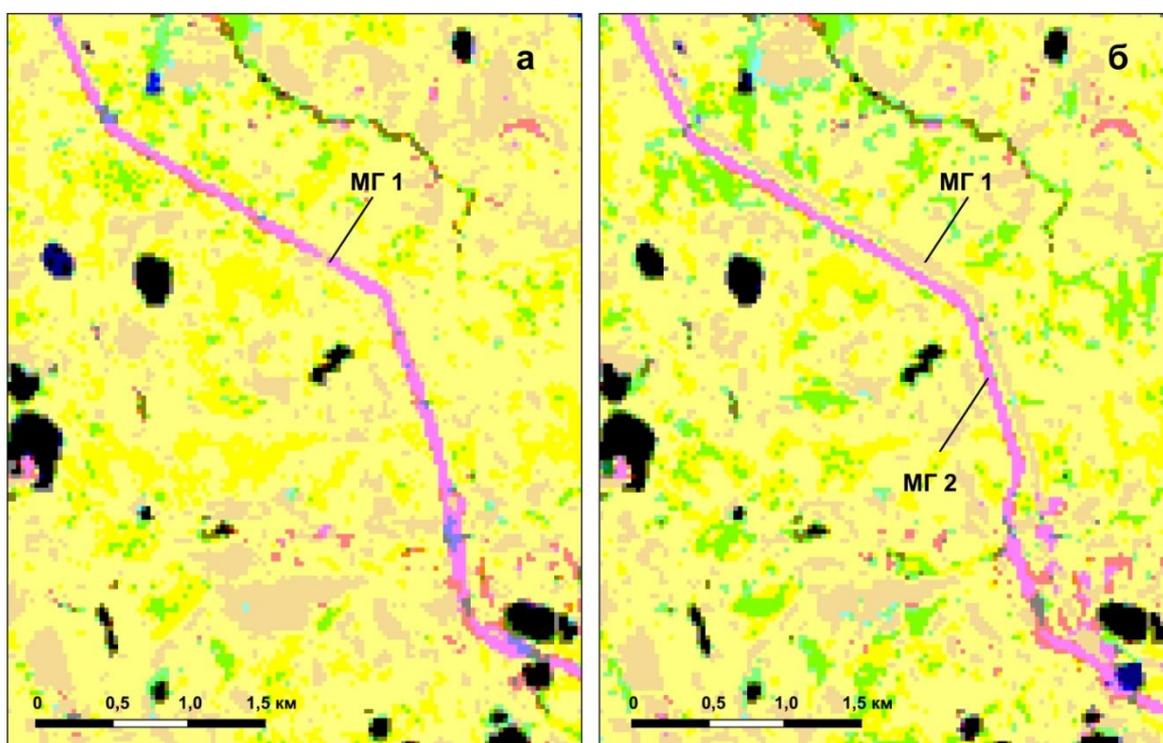


Рис. 3. Фрагменты карт определения положения погребенных трубопроводов по классифицированным:
 а – RGB (5, 4, 3 каналы) изображениям спутника Landsat 5 14.07.2011 г.;
 б – RGB (6, 5, 4 каналы) изображениям спутника Landsat 8 19.07.2013 г.

Аналогично определялось положение участков нарушений над вторым газопроводом (МГ2) по изображению 2013 года съемки (рис. 3б). К этому году нарушенные участки над газопроводом МГ1 начали зарастать, на что указывает изменение цвета на RGB изображении (рис. 3б). Ширина участков нарушений не постоянна – на RGB изображениях

колеблется от 1 до 3 пикселей. По участкам нарушений поверхности формировались полосы наблюдений (области анализа) МГ1 и МГ2 шириной 45 м. Каждая полоса наблюдений по ширине захватывала полтора пикселя изображений, относящихся к участкам нарушений. Полосы наблюдений буферных зон формировались с внешних сторон полос наблюдений МГ1 и МГ2.

Известно, что изменение пропускания атмосферы, различия времени и угла съемки, а также различия калибровочных характеристик съемочных систем приводят к радиометрическим искажениям (погрешностям), которые никак не связаны с состоянием поверхности [24–26]. При анализе данных, полученных в разные годы, влияние подобных факторов может существенно исказить распределение параметров, характеризующих исследуемые изменения в ландшафте. Для снижения подобного влияния используются методы радиометрической нормализации (коррекции) временного ряда изображений, построенных по данным дистанционного зондирования Земли [24–29]. В результате, все скорректированные (нормализованные) изображения должны выглядеть так, как если бы они были получены одним и тем же датчиком, при одинаковых атмосферных условиях и освещенности [26]. В настоящей работе для снижения влияния погрешностей подобного рода применялась методика относительной радиометрической нормализации изображений по параметрам NDVI, NDWI и Alb, подробно описанная в [30, 31], когда все изображения преобразуются к виду одного – опорного изображения.

Для нормализации использовалась область фонового, условно ненарушенного состояния ландшафтов, которая в данном случае охватывала практически весь район (см. рис. 1б), за исключением полосы шириной 2 км вдоль газопровода (отмечена белым цветом на рис. 1б) и водных объектов. После нормализации изменения параметров в исследуемых зонах реальных и/или предполагаемых техногенных нарушений покрова

минимально связаны с отмеченными выше радиометрическими искажениями. В то же время, изменения параметров после нормализации не несут информации о составляющих, обусловленных более общими тенденциями, в частности, климатическим трендом. Согласно применяемой методике [30, 31] в качестве опорных (эталонных) использовались изображения Landsat 8 с датой съемки 20.07.2020 г., поскольку они имели наиболее высокие контрасты значений параметров по сравнению с изображениями других дат съемки. Нормализованные изображения имеют шкалы значений по каждому параметру, соответствующие шкалам параметров опорных изображений.

Для характеристики преобладающих тенденций изменения параметров NDVI, NDWI и Alb, рассчитанных по данным Landsat определялись их средние значения и среднеквадратические отклонения (СКО) в границах каждой из полос наблюдений над газопроводом и в буферных зонах (см. рис. 1в). Все расчеты проводились по выборкам данных с доверительными интервалами 99%. В данном случае, при нормализации изображений по каждому параметру согласно [30, 31], любые отклонения средних значений параметров от первоначальных значений рассматриваются как связанные с техногенной (антропогенной) трансформацией ландшафта.

Снимки высокого пространственного разрешения со спутников GeoEye–1 и PlanetScope (см. табл. 2) использовались для сравнения с результатами, полученными по снимкам со спутников Landsat 5, 8 с датами съемки 14.07.2011 г. и 23.07.2017 г. – близкими к датам съемки со спутников GeoEye–1 и PlanetScope.

После преобразования исходных снимков со спутников GeoEye-1 и PlanetScope в проекцию снимков со спутников Landsat (UTM, datum WGS-84) мультиспектральные изображения со спутника GeoEye-1 имели пространственное разрешение 2,0 м, а со спутников PlanetScope – 3,0 м. Для сравнительного анализа изображений, полученных со спутников GeoEye-1 и PlanetScope, изображения со спутника GeoEye-1 были преобразованы до разрешения изображений со спутников PlanetScope. Спектральные каналы сканеров GeoEye-1 и PlanetScope не позволяют рассчитать параметр NDWI, в то же время по этим КСВР могут быть рассчитаны коротковолновое альbedo и вегетационный индекс NDVI, что позволяет сравнить изображения по этим параметрам с результатами, полученными по данным Landsat.

Предварительная обработка снимков со спутников GeoEye-1 и PlanetScope включала калибровку спектральных каналов, формирование фрагмента территории (см. рис. 1в) и расчет параметров Alb [16] и NDVI [14]. Радиометрическая нормализация изображений по параметрам Alb и NDVI, рассчитанным по снимку со спутников PlanetScope проводилась с использованием алгоритма Histogram Matching (HM) в программном комплексе ENVI 5.3. В качестве опорных (эталонных) изображений использовались изображения по параметрам Alb и NDVI снимка GeoEye-1. К фоновой, условно ненарушенной области, в границах которой проводилась нормализация, был отнесен весь участок анализа КСВР (см. рис. 1в), за исключением

водных объектов, полос наблюдений МГ1, МГ2, участков между ними и полос наблюдений их буферных зон. После процедуры нормализации изображения по параметрам Alb и NDVI, рассчитанные по снимку PlanetScope, имели шкалы значений, соответствующие шкалам значений этих параметров, рассчитанных по снимку GeoEye-1.

Результаты исследований

На рис. 4 приведены нормализованные изображения индекса NDVI, построенные по снимкам Landsat 5, 8 с датами съемки 2009 г. (рис. 4а), 2011 г. (рис. 4б) и 2013 г. (рис. 4в) на фрагмент анализируемого участка магистрального газопровода «Бованенково-Байдарацкая губа». Индекс NDVI весьма чувствителен к изменениям растительного покрова тундровой зоны и может служить индикатором этапов прокладки первого (рис. 4б) и второго (рис. 4в) газопроводов. В рассматриваемом районе (см. рис. 1б) прокладка первого газопровода (МГ1) проводилась в конце 2009 г. и в 2010 г., поэтому по летнему снимку 2009 года (рис. 4а) никаких признаков земляных работ и существенных нарушений почвенного покрова не отмечается. На изображении NDVI 2011 года съемки (рис. 4б) трасса первого газопровода МГ1 отчетливо проявляется более низкими значениями индекса. Такими же относительно низкими значениями индекса NDVI трасса второго газопровода МГ2 проявляется на изображении 2013 года съемки (рис. 4в), в то время как над трассой МГ1 значения NDVI проявляются уже не столь контрастно по сравнению с изображением индекса 2011 года (рис. 4б).

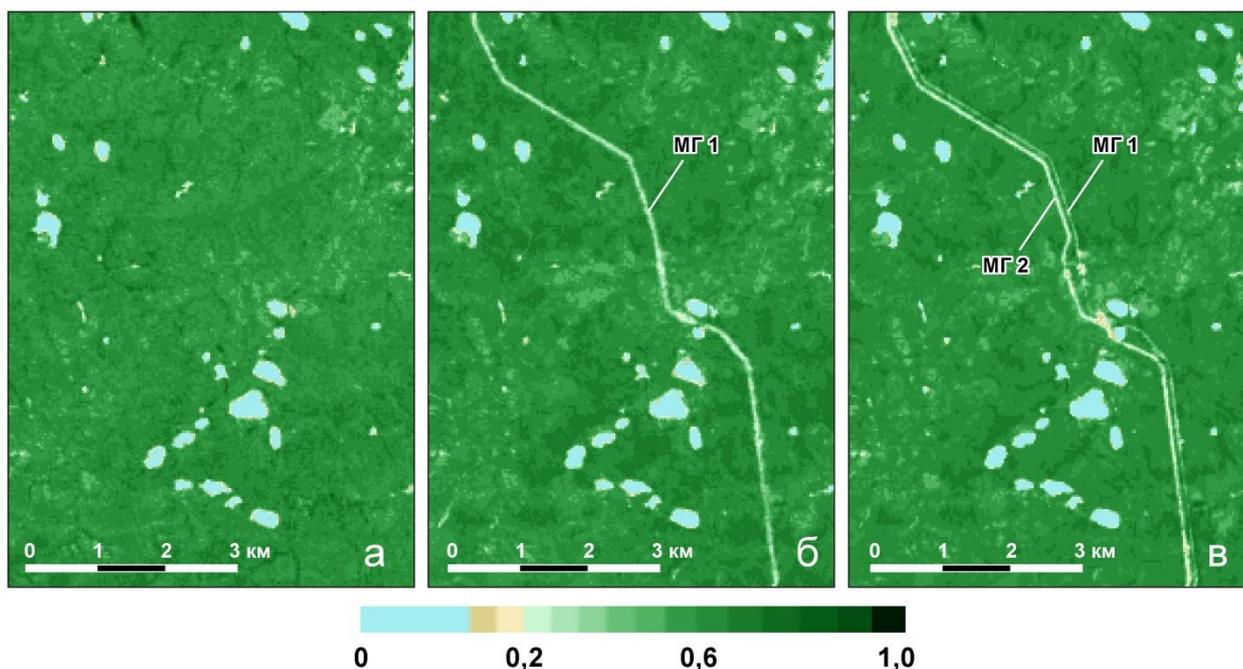


Рис. 4. Нормализованные изображения индекса NDVI (Landsat 5, 8): а – 2009 г.; б – 2011 г.; и в – 2013 г. на фрагмент анализируемого участка «Бованенково–Байдарацкая Губа» трассы МГ

На рис. 5 приведены графики, характеризующие изменения средних значений (рис. 5а, 5в, 5д) и среднеквадратических отклонений (СКО) (рис. 5б, 5г, 5е) параметров NDVI, NDWI и Alb за период с 2009 по 2020 гг. по полосе наблюдений над газопроводом МГ1, а также по полосам его буферной зоны П1(МГ1) и П2(МГ1). Аналогичные графики для полосы наблюдений над вторым газопроводом МГ2 и полос П1(МГ2) и П2(МГ2) приведены на рис. 6.

На рис. 7 приведены фрагменты изображений по параметру Alb, построенные по снимкам Landsat 5 14.07.2011 г. (рис. 7а), Landsat 8 23.07.2017 г. (рис. 7б), а также по КСВР со спутников GeoEye – 1 30.07.2010 г. (рис. 7в) и PlanetScope 23.07.2017 г. (рис. 7г) на небольшой участок (см. рис. 1в) анализируемого района. Аналогичные фрагменты изображений по параметру NDVI приведены на рис. 8. Тонкими белыми линиями на рис. 7 и 8 обозначены границы полос наблюдений МГ1 и МГ2 над газопроводами. На рис. 7а, 7в и рис. 8а, 8в полоса наблюдений газопровода МГ2 соответствует положению второй нитки газопровода, строительство которой было начато позже, в 2012 году.

В табл. 3 приведены средние значения параметров Alb и NDVI для фрагментов полос наблюдений МГ1 и МГ2 (см. рис. 7, 8), рассчитанные по снимкам со спутников Landsat (14.07.2011; 23.07.2017 г.) и по КСВР (GeoEye-1 30.07.2010 г.; PlanetScope 23.07.2017 г.).

Таблица 3

Средние значения параметров Alb и NDVI для фрагментов полос наблюдений МГ1 и МГ2, рассчитанные по снимкам со спутников Landsat (14.07.2011; 23.07.2017 г.) и по КСВР (GeoEye-1 30.07.2010 г.; PlanetScope 23.07.2017 г.)

	МГ1				МГ2			
	Landsat		КСВР		Landsat		КСВР	
	14.07.2011 г.	23.07.2017 г.	30.07.2010 г.	23.07.2017 г.	14.07.2011 г.	23.07.2017 г.	30.07.2010 г.	23.07.2017 г.
Alb	0,148	0,186	0,146	0,187	0,172	0,184	0,167	0,185
NDVI	0,380	0,634	0,512	0,576	0,675	0,573	0,627	0,499

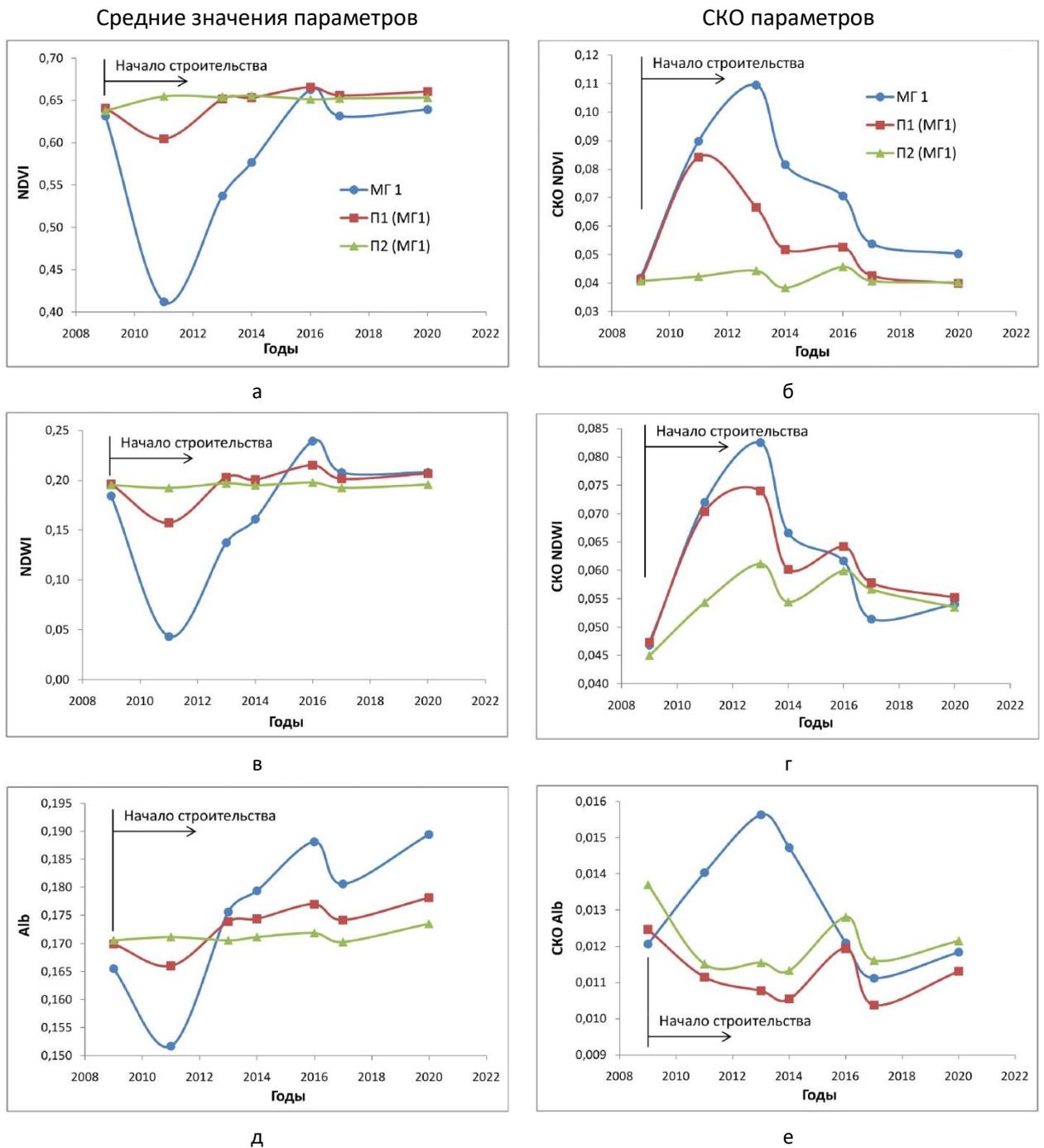


Рис. 5. Многолетние вариации средних значений и среднеквадратических отклонений (SKO) параметров:
 а, б – NDVI; в, г – NDWI; д, е – Alb;
 МГ1 – полоса наблюдений над первой ниткой газопровода,
 П1(МГ1) и П2(МГ1) – полосы наблюдений буферной зоны
 вдоль первой нитки газопровода

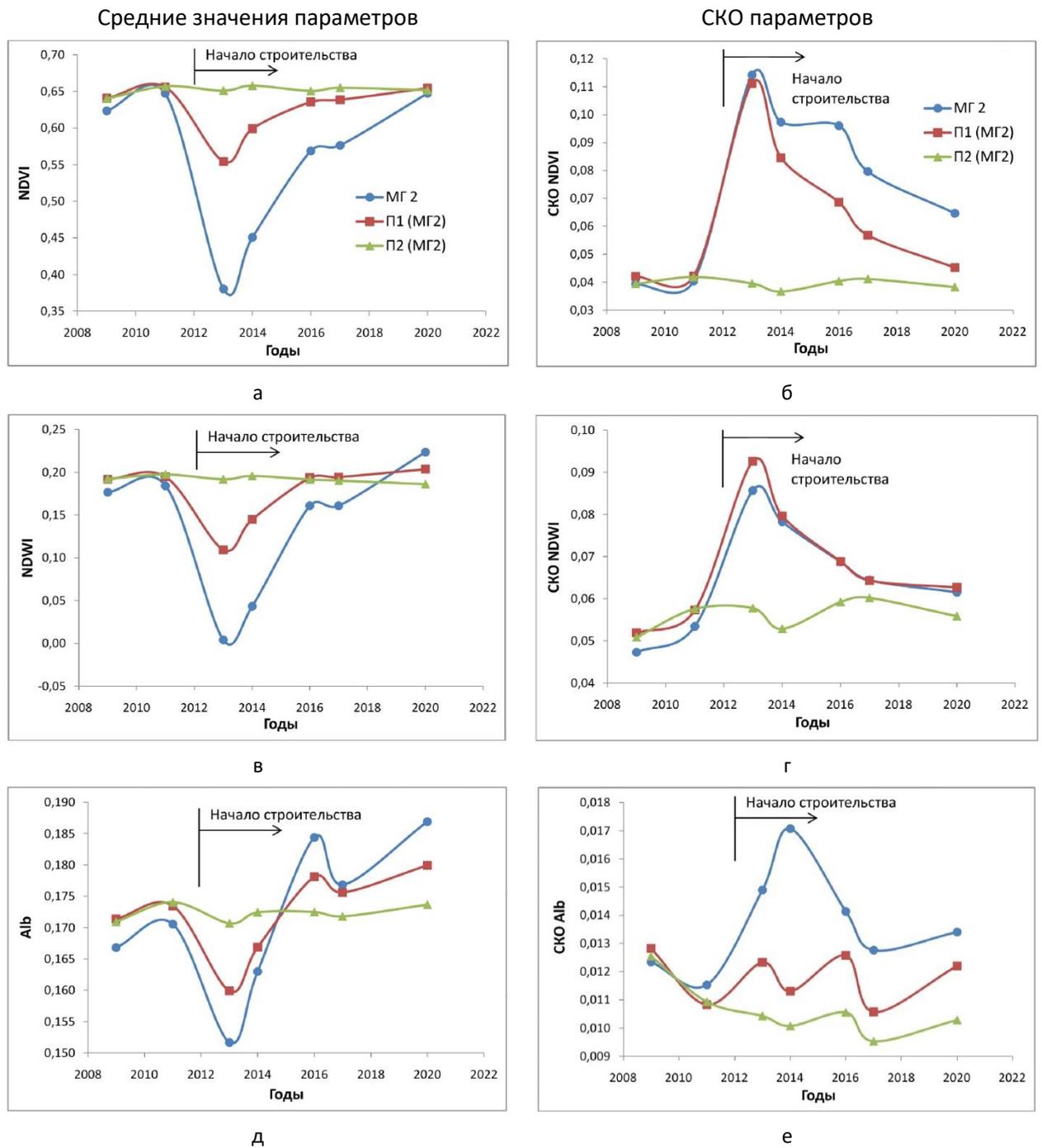


Рис. 6. Многолетние вариации средних значений и среднеквадратических отклонений (SKO) параметров:
 а, б – NDVI; в, г – NDWI; д, е – Alb;
 МГ2 – полоса наблюдений над второй ниткой газопровода,
 П1(МГ2) и П2(МГ2) – полосы наблюдений буферной зоны
 вдоль второй нитки газопровода

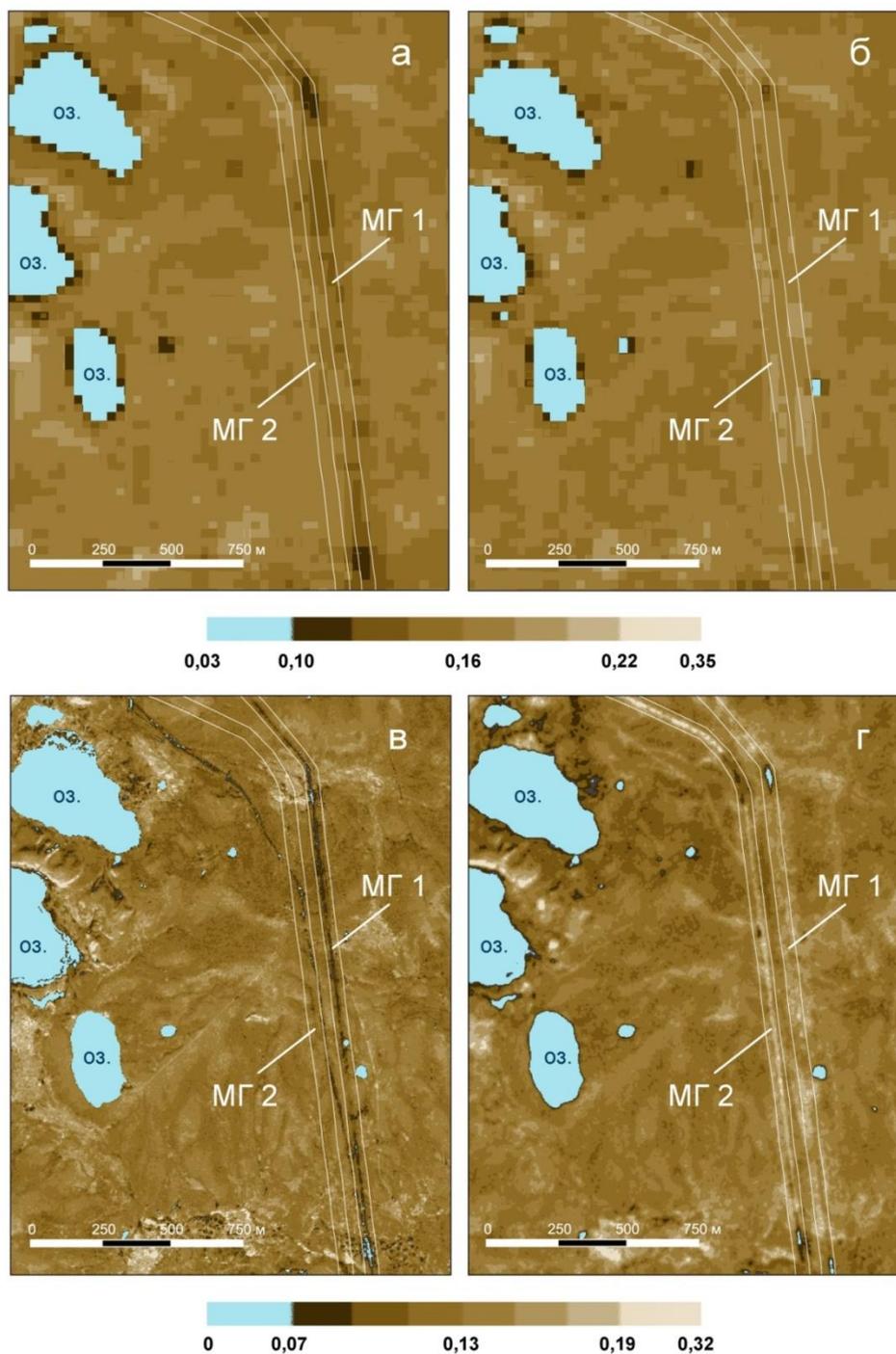


Рис. 7. Изменение параметра Alb по данным со спутников:
 а – Landsat 5 (14.07.2011 г.);
 б – Landsat 8 (23.07.2017 г.);
 в – GeoEye-1 (30.07.2010 г.);
 г – PlanetScope (23.07. 2017 г.)
 на участке «Бованенково–Байдарацкая Губа» трассы МГ

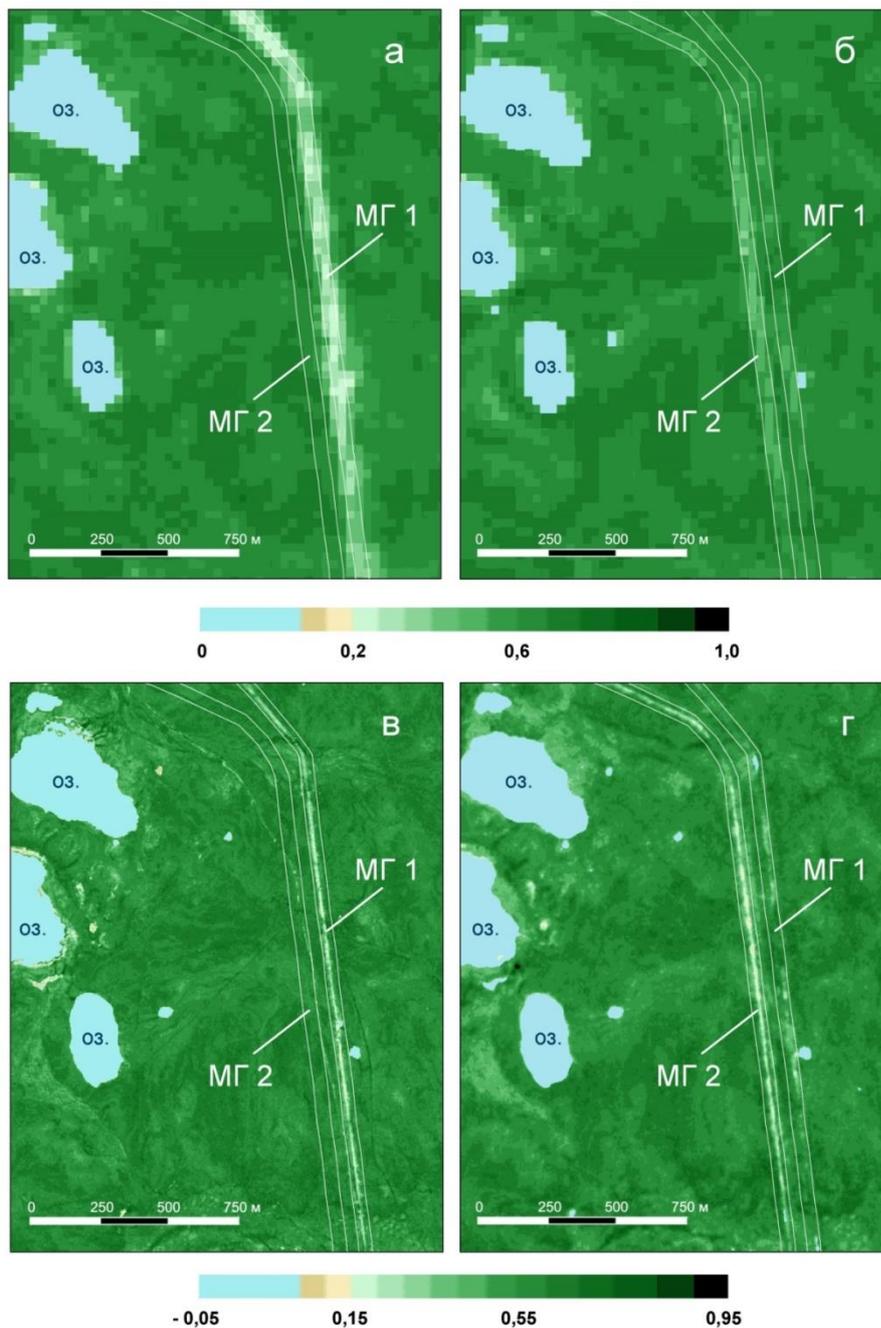


Рис. 8. Изменение параметра NDVI по данным со спутников:

а – Landsat 5 14.07.2011 г.;

б – Landsat 8 23.07.2017 г.;

в – GeoEye – 1 30.07.2010 г.;

г – PlanetScope 23.07. 2017 г.

на участке «Бованенково–Байдарацкая Губа» трассы МГ

Визуальное сравнение изображений на рис. 7 и рис. 8 и сопоставление средних значений параметров в табл. 3 показывают, что в границах полос

наблюдений МГ1 и МГ2 по КСВР и по данным Landsat наблюдаются идентичные по направленности изменения параметров Alb и NDVI.

В частности, к 2017 году отмечается рост Alb по обеим полосам наблюдений, рост индекса NDVI в полосе МГ1 и его снижение в полосе МГ2 (см. табл. 3). Данный факт может служить подтверждением достоверности результатов, полученных на основе снимков со спутников Landsat.

Обсуждение результатов

Анализ параметров NDVI, NDWI и Alb , рассчитанных по снимкам со спутников Landsat одновременно по полосам наблюдений двух газопроводов и их буферных зон позволяет убедиться, что наблюдаемые изменения не случайны и несут информацию о сроках относительной стабилизации состояния напочвенного покрова, а также об ареалах антропогенного воздействия, связанного со строительством газопроводов.

Отмечаемые до начала строительства относительно высокие для тундровой растительности средние значения индекса NDVI (0,62–0,64) (см. рис. 5а, рис. 6а) свидетельствуют о преобладании видов с высоким содержанием хлорофилла (сосудистые растения, зеленые мхи) [19]. В этой связи, нарушения растительного покрова должны сопровождаться снижением индекса NDVI, поскольку для открытых грунтов и почв значения этого индекса меньше 0,20 [32, 33]. До начала строительства средние значения параметров NDVI, NDWI и Alb по всем полосам практически не отличаются. Непосредственно после укладки трубопроводов и их обвалования вырытым из траншеи грунтом в полосах МГ1 и МГ2 значения параметров NDVI, NDWI и Alb резко падают (см. рис. 5а, 5в, 5д; рис. 6а, 6в, 6д, кривые синего цвета).

Подобные изменения связаны с удалением растительного покрова и заменой его на обнаженный грунт, что приводит к снижению транспирации, уменьшению влажности на поверхности и увеличению доли поглощенной радиации. Снижение Alb указывает на то, что грунт преимущественно не песчаный, иначе бы Alb увеличивался (песок характеризуется более высокими значениями этого параметра). На данной стадии значения параметров NDVI, NDWI и Alb характеризуют биофизические свойства поверхности, при которых возможно увеличение глубины талого слоя и деградация мерзлоты.

После прокладки трубопровода, по мере развития вторичных сукцессий растительности, средние значения параметров NDWI и NDVI постепенно повышаются и через 5–7 лет стабилизируются, возвращаясь к первоначальным значениям. После падения рост Alb на 13–15% от начальных значений указывает на формирование нового типа поверхности или напочвенного покрова, отличающегося от первоначального. Повышение альбедо приводит к снижению доли поглощаемой солнечной радиации, что при прочих равных условиях способствует снижению температуры грунтов и уменьшению глубины сезонно-талого слоя. В данном случае, повышение Alb при сохранении влажности поверхности (по индексу NDWI) может быть благоприятным фактором для стабилизации состояния мерзлых грунтов над газопроводами. В том случае, если бы значения параметров NDVI, NDWI и Alb оставались бы низкими, вероятность деградации мерзлоты была бы выше.

Вариации средних значений параметров для ближайших к ниткам полос П1(МГ1) и П1(МГ2) (на рис. 5а, 5в, 5д; рис. 6а, 6в, 6д кривые красного цвета) достаточно близки к изменениям параметров для полос МГ1 и МГ2, но существенно ниже по амплитудам. Данный факт указывает на схожесть циклов нарушения и восстановления покрова, но значительно меньшей интенсивности в полосах П1(МГ1) и П1(МГ2) буферной зоны. В границах полос П2(МГ1) и П2(МГ2) вариации средних значений параметров (см. рис. 6а, 6в, 6д; рис. 6а, 6в, 6д, кривые зеленого цвета) меняются незначительно и практически никак не отражают процессы нарушения и восстановления покрова, признаки которых наблюдаются в полосах МГ1, МГ2 и ближайших к ним полосах П1(МГ1) и П1(МГ2). В табл. 4 приведены значения коэффициентов

корреляции (R) между распределениями параметров для полос наблюдений над газопроводами МГ1 и МГ2 и полос их буферных зон. Наиболее высокие значения коэффициентов R соответствуют парам полос МГ1–П1(МГ1) и МГ2–П1(МГ2), что также указывает на связь циклов нарушений и восстановления покрова ближних к ниткам газопровода полос буферной зоны. Низкие значения коэффициентов R соответствуют парам полос МГ1–П2(МГ1) и МГ2–П2(МГ2), что свидетельствует об отсутствии выявляемых по данным Landsat аналогичных полосам МГ1 и МГ2 признаков нарушения и последующего восстановления покрова в дальних полосах буферной зоны, т. е. на расстоянии более 70–90 м от центральных осей каждого из трубопроводов (с учетом возможной ошибки определения их положения).

Таблица 4

Значения коэффициентов корреляции (R) между вариациями средних значений параметров для полос наблюдений вдоль ниток газопроводов

Параметр	МГ1–П1(МГ1)	МГ1–П2(МГ1)	МГ2–П1(МГ2)	МГ2–П2(МГ2)
NDVI	0,874	0,400	0,977	0,209
NDWI	0,915	0,470	0,973	0,339
Alb	0,933	0,485	0,980	0,600

Вариации среднеквадратических отклонений параметров связаны с изменением степени неоднородности поверхности и могут характеризовать стадии нарушения и восстановления покрова [31]. После начала строительства газопроводов значения СКО всех параметров над полосами МГ1 и МГ2 резко увеличиваются, а в последующие 5–7 лет постепенно снижаются и, также как и средние значения параметров, приближаются к своим первоначальным значениям (см. рис. 5б, 5г, 5е; рис. 6б, 6г, 6е, кривые синего цвета).

Вариации СКО параметров для полос П1(МГ1) и П1(МГ2) (кривые красного цвета) близки по характеру к изменениям СКО над полосами МГ1 и МГ2. Исключение составляют вариации СКО параметра Alb (см. рис. 5е, рис. 6е), которые не превышают первоначальных значений. Подобный факт может быть связан с разными типами нарушений поверхности, в частности, на полосах МГ1 и МГ2 выемка грунта и обвалование приводят к более высокой неоднородности поверхности, а в полосах П1(МГ1) и П1(МГ2) разъемы гусеничной техники не приводят к заметному увеличению разброса по параметру Alb.

Вариации СКО параметров для дальних полос П2(МГ1) и П2(МГ2) (кривые зеленого цвета) незначительны по амплитудам и, также как и средние значения, практически не проявляют связи с вариациями СКО, наблюдаемыми в полосах МГ1 и МГ2. Таким образом, распределения СКО параметров также подтверждают отсутствие признаков нарушения и последующего восстановления напочвенного покрова на расстоянии более 70–90 м от центральных осей каждого из трубопроводов.

В наиболее близкой по задачам работе на примере отдельного участка в Надымском районе рассматривалась информативность снимков Landsat для характеристики изменений растительности вблизи техногенных объектов [2]. Для оценки ареалов антропогенного воздействия на растительный покров анализировались средние значения параметров NDVI, NDWI и Alb в двадцати полосах наблюдений шириной 30 м вдоль линейных техногенных объектов (трубопроводов, дорог). Был сделан вывод о том, что антропогенное воздействие на растительность наблюдается на расстоянии не более 100 м от объектов и сохраняется на протяжении двадцатилетнего периода наблюдений. По мере приближения к объектам значения индексов NDVI и NDWI снижались, а значения параметра Alb повышались, что, скорее всего, связано, с влиянием песчаных отсыпок по периметрам объектов. Авторы не ставили задачу разделения влияния антропогенных и природных факторов на изменение растительного покрова, а также не рассматривались сроки восстановления и стабилизации его состояния на нарушенных ландшафтах.

Отличительная особенность данной работы состоит в применении методики

нормализации временного ряда изображений по анализируемым параметрам (NDVI, NDWI, Alb), что позволяет оценить влияние антропогенной составляющей трансформации растительного покрова на фоне климатических трендов, а также характеризовать сроки восстановления покрова и стабилизации состояния поверхности над подземными газопроводами после их строительства.

Заключение

Полученные результаты в целом свидетельствуют о возможности и перспективности использования временных рядов данных спутников Landsat для оценки влияния антропогенной составляющей на изменение состояния напочвенного растительного покрова при строительстве подземных магистральных газопроводов в районах арктических и субарктических тундр. Корректная оценка стадий антропогенных трансформаций (нарушение, восстановление, изменение) покрова может проводиться по нормализованным изображениям, в частности, характеризующим распределения значений индексов NDVI (содержание хлорофилла), NDWI (влажность поверхности), а также параметра Alb (альбедо).

Многопараметрический анализ нормализованных изображений позволяет более достоверно характеризовать тип антропогенных трансформаций напочвенного покрова на фоне климатических факторов влияния и прогнозировать наиболее вероятные изменения состояния многолетнемерзлых грунтов. В частности на анализируемом участке «Бованенково–Байдарацкая Губа» трассы магистрального газопровода «Бованенково–Ухта» непосредственно над двумя трубопроводами после их укладки значения всех параметров резко снижаются и стабилизируются через 5–7 лет.

К концу этого периода значения индексов NDVI и NDWI восстанавливаются до первоначальных величин, а параметр Alb повышается на 13–15% по отношению к уровню до начала строительства. Признаки нарушения и восстановления покрова, связанные со строительством газопровода фиксируются на расстоянии не более 70–90 м от центральных осей каждого из трубопроводов. Несмотря на то, что в отдельных местах над газопроводами

наблюдаются локальные обводнения, подтопления и эрозионные процессы на анализируемом участке через 5–7 лет после строительства не наблюдаются какие-либо доминирующие изменения параметров NDVI, NDWI, Alb, свидетельствующие о трансформации биофизических свойств поверхности, при которых повышается вероятность деградации многолетней мерзлоты и дестабилизация состояния трубопроводов.

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата», № 122022800264-9).

Литература

1. Пендин В.В., Ганова С.Д. Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне. М.: ПНИИИС, 2009. 236 с.
2. Yu Q., Epstein H.E., Engstrom R. et al. Land cover and land use changes in the oil and gas regions of Northwestern Siberia under changing climatic conditions // *Environmental Research Letters*. 2015. Vol. 10, No. 12. P. 124020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124020>
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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-128-136>
4. Kumpula T., Forbes B.C., Stammner F., Meschtyb N. Dynamics of a coupled system: Multi-resolution remote sensing in assessing social-ecological responses during 25 years of gas field development in Arctic Russia // *Remote Sensing*. 2012. Vol. 4, No. 4. P. 1046–1068. <https://doi.org/10.3390/rs4041046>
5. Ardelean F., Onaca A., Chețan M.-A. et al. Assessment of spatio-temporal landscape changes from VHR images in three different permafrost areas in the Western Russian Arctic // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 23. P. 3999. <https://doi.org/10.3390/rs12233999>
6. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: В 3 т. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: Газпром экспо, 2013. 422 с.
7. Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Научный мир, 2010. 350 с.
8. Морозова Л.М., Магомедова М.А. Структура растительного покрова и растительные ресурсы полуострова Ямал. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2004. 63 с.
9. 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.

10. *Герман Е.В., Кисляков В.Н., Рейнин И.В.* Геология и геоморфология п-ва Ямал – нового района перспективного для поисков нефти и газа // Геология и нефтегазоносность севера Западной Сибири. Л.: Гостоптехиздат, 1963. С. 311–329. (Труды ВНИГРИ. Вып. 225).
11. *Корниенко С.Г., Якубсон К.И., Дубровин В.А.* и др. Аэрокосмический геоэкологический мониторинг трассы газопровода «Бованенково–Байдарацкая губа» // Газовая промышленность. 2013. № 7(693). С. 24–27.
12. Google Earth. <https://earth.google.com/web/@69.98027146,68.27351586,14.12288202a,586.78496523d,35y,0h,0t,0r> (Дата обращения 24.10.2022).
13. Global Visualization Viewer. <https://glovis.usgs.gov/app> (Дата обращения 24.10.2022).
14. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
15. *Gao B.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 58, No. 3. P. 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
16. *Liang S.* Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I – Algorithms // Remote Sensing of Environment. 2000. Vol. 76, No. 2. P. 213–238. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4)
17. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27, No. 14. P. 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
18. *Gamon J.A., Huemmrich K.F., Stone R.S., Tweedie C.E.* Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: Decreased vegetation growth following earlier snowmelt // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 129. P. 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.030>
19. *Huemmrich K.F., Zesati S.V., Campbell P., Tweedie C.* Canopy reflectance models illustrate varying NDVI responses to change in high latitude ecosystems // Ecological Applications. 2021. Vol. 31, No 8. P. e02435. <https://doi.org/10.1002/eap.2435>
20. *May J.L., Hollister R.D., Betway K.R., Harris J.A.* et al. NDVI Changes show warming increases the length of the green season at tundra communities in Northern Alaska: A fine-scale analysis // Frontiers in Plant Science. 2020. Vol. 11. P. 1174. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01174>
21. *Laidler G.J., Treitz P.M., Atkinson D.M.* Remote sensing of Arctic vegetation: Relations between the NDVI, spatial resolution and vegetation cover on Boothia Peninsula, Nunavut // Arctic. 2008. Vol. 61, No. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.14430/arctic2>
22. *Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А.* и др. «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2(30). С. 31–44. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-2-31-44>.
23. *Jacob F., Olioso A., Gub X.F.* et al. Mapping surface fluxes using airborne visible, near infrared, thermal infrared remote sensing data and a spatialized surface energy balance model // Agronomie. 2002. Vol. 22, No. 6. P. 669–680. <https://doi.org/10.1051/agro:2002053>

24. Yuan D., Elvidge C.D. Comparison of relative radiometric normalization techniques // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1996. Vol. 51, No. 3. P. 117–126. [https://doi.org/10.1016/0924-2716\(96\)00018-4](https://doi.org/10.1016/0924-2716(96)00018-4)
25. Wu W., Sun X., Wang X. et al. A long time-series radiometric normalization method for Landsat images // Sensors. 2018. Vol. 18. P. 4505. <https://doi.org/10.3390/s18124505>
26. Paolini L., Grings F., Sobrino J.A. et al. Radiometric correction effects in Landsat multi-date/multi-sensor change detection studies // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27, No. 4. P. 685–704. <https://doi.org/10.1080/01431160500183057>
27. 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. P. 1025–1036. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.013>
28. 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, No. 19. P. 3990. <https://doi.org/10.3390/rs13193990>
29. Xu H., Wei Y., Li X. et al. A novel automatic method on pseudo-invariant features extraction for enhancing the relative radiometric normalization of high-resolution images // International Journal of Remote Sensing. 2021. Vol. 42, No. 16. P. 6153–6183. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1934912>
30. Kornienko S.G. Radiometric normalization of Landsat thermal imagery for detection of tundra land cover changes: experience from West Siberia // International Journal of Remote Sensing. 2021. Vol. 42, No. 4. P. 1420–1449. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1832280>
31. 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129>
32. Nelson P.R., Maguire A.J., Pierrat Z. et al. Remote sensing of tundra ecosystems using high spectral resolution reflectance: Opportunities and challenges // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2022. Vol. 127, No. 2. P. e2021JG006697. <https://doi.org/10.1029/2021JG006697>
33. Корниенко С.Г. Вариации коэффициентов в красной, ближней инфракрасной области спектра и индекса NDVI образцов тундровой растительности в зависимости от влажности субстратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 225–234. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-225-234>

Using images from Landsat satellites to characterize the transformations of the ground cover at the Bovanenkovo–Baydaratskaya Bay section of the route of the Bovanenkovo–Ukhta gas pipeline

S.G. Kornienko

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Abstract. By the case of the Bovanenkovo–Baydaratskaya Bay section of the route of the two underground gas pipelines located on the Yamal Peninsula, the possibility of using images from Landsat 5 and Landsat 8 satellites to characterize the transformations of the ground cover associated with the laying of pipelines is shown. The studies were carried out using seven summer time images (July, August) for the period from 2009 to 2020 based on parameters characterizing the chlorophyll content in the vegetation cover – the vegetation index (NDVI), the moisture index (NDWI) and the albedo (Alb) of the surface. In the year of laying the pipelines, directly above them, the average values of these parameters sharply decrease, and after 5–7 years, the values of the NDVI and NDWI indices stabilize to the initial values. During the same period, the average values of Alb increase by 13–15% relative to the initial level. According to the analyzed parameters, signs of disturbance and restoration of the ground vegetation cover are not recorded at a distance of more than 70–90 m from the central axis of each of the pipelines. In general, by the end of the analyzed period, no dominant changes in the NDVI, NDWI and Alb parameters are observed, indicating the transformations of the biophysical properties of the surface, which increase the likelihood of degradation of permafrost and destabilization of the state of pipelines.

Keywords: monitoring, main gas pipeline, Landsat, albedo, NDVI index, NDWI index, tundra, ground cover transformation.

Citation: Kornienko S.G. Using images from Landsat satellites to characterize the transformations of the ground cover at the Bovanenkovo–Baydaratskaya Bay section of the route of the Bovanenkovo–Ukhta gas pipeline // Actual Problems of Oil and Gas. 2022. Iss. 4(39). P. 126–147 <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-39.art10> (In Russ.).

References

1. *Pendin V.V., Ganova S.D.* Geocological monitoring of the territories where gas transportation facilities are located in the permafrost zone. Moscow: PNIIS, 2009. 236 p. (In Russ.).
2. *Yu Q., Epstein H.E., Engstrom R.* et al. Land cover and land use changes in the oil and gas regions of Northwestern Siberia under changing climatic conditions // Environmental Research Letters. 2015. Vol. 10, No. 12. P. 124020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124020>
3. *Lavrinenko I.A.* Map of technogenic disturbance of Nenets Autonomous District // Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2018. Vol. 15, No. 2. P. 128–136. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-128-136> (In Russ.).
4. *Kumpula T., Forbes B.C., Stammler F., Meschtyb N.* Dynamics of a coupled system: Multi-resolution remote sensing in assessing social-ecological responses during 25 years of gas field development in Arctic Russia // Remote Sensing. 2012. Vol. 4, No. 4. P. 1046–1068. <https://doi.org/10.3390/rs4041046>

5. *Ardelean F., Onaca A., Cheţan M.-A., Dornik A. et al.* Assessment of spatio-temporal landscape changes from VHR images in three different permafrost areas in the Western Russian Arctic // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 23. P. 3999. <https://doi.org/10.3390/rs12233999>
6. Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula: In 3 vols. Vol. 2. Cryosphere of the Bovanenkovo oil and gas condensate field / Ed. by Yu. B. Badu, N.A. Gafarov, E.E. Podborny. Moscow: Gazprom Expo, 2013. 422 p. (In Russ.).
7. *Kritsuk L.N.* Underground ice of Western Siberia. Moscow: Nauchnyi Mir, 2010. 350 p. (In Russ.).
8. *Morozova L.M., Magomedova M.A.* Land cover structure and plant resources of the Yamal Peninsula. Yekaterinburg: Ural State University, 2004. 63 p. (In Russ.).
9. *Kritsuk L.N., Dubrovin V.A.* Maps of geocryological zoning as a basis geocological assessment of the developed territory of the permafrost zone // *Razvedka i Okhrana Nedr*. 2003. No. 7. P. 12–15. (In Russ.)
10. *German E.V., Kislyakov V.N., Reinin I.V.* Geology and geomorphology of the Yamal Peninsula – a new area promising for oil and gas exploration // *Geology and oil and gas prospects of the north of Western Siberia*. Leningrad: Gostoptekhizdat, 1963. P. 311–329. (Trudy VNIGRI. Iss. 225). (In Russ.).
11. *Kornienko S.G., Yakubson K.I., Dubrovin V.A. et al.* Aerospace geocryological monitoring of the Bovanenkovo–Baidaratskaya Guba gas pipeline route // *Gazovaya Promyshlennost*. 2013. No. 7(693). P. 24–27. (In Russ.)
12. Google Earth. <https://earth.google.com/web/@69.98027146,68.27351586,14.12288202a,586.78496523d,35y,0h,0t,0r> (Accessed on 24.10.2022).
13. Global Visualization Viewer. <https://glovis.usgs.gov/app> (Accessed on 24.10.2022).
14. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
15. *Gao B.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58, No. 3. P. 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
16. *Liang S.* Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I – Algorithms // *Remote Sensing of Environment*. 2000. Vol. 76, No. 2. P. 213–238. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4).
17. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, No. 14. P. 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
18. *Gamon J.A., Huemmrich K.F., Stone R.S., Tweedie C.E.* Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: Decreased vegetation growth following earlier snowmelt // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 129. P. 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.030>
19. *Huemmrich K.F., Zesati S.V., Campbell P., Tweedie C.* Canopy reflectance models illustrate varying NDVI responses to change in high latitude ecosystems // *Ecological Applications*. 2021. Vol. 31, No. 8. P. e02435. <https://doi.org/10.1002/eap.2435>

20. *May J.L., Hollister R.D., Betway K.R.* et al. NDVI Changes show warming increases the length of the green season at tundra communities in Northern Alaska: A fine-scale analysis // *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. P. 1174. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01174>
21. *Laidler G.J., Treitz P.M., Atkinson D.M.* Remote sensing of Arctic vegetation: Relations between the NDVI, spatial resolution and vegetation cover on Boothia Peninsula, Nunavut // *Arctic*. 2008. Vol. 61, No. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.14430/arctic2>
22. *Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Vaisfeld M.A.* et al. “The greening” of the tundra as a driver of the modern dynamics of Arctic biota // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2018. No. 2(30). P. 31–44. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-2-31-44> (In Russ.).
23. *Jacob F., Olioso A., Gub X.F.* et al. Mapping surface fluxes using airborne visible, near infrared, thermal infrared remote sensing data and a spatialized surface energy balance model // *Agronomie*. 2002. Vol. 22, No. 6. P. 669–680. <https://doi.org/10.1051/agro:2002053>
24. *Yuan D., Elvidge C.D.* Comparison of relative radiometric normalization techniques // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1996. Vol. 51, No. 3. P. 117–126. [https://doi.org/10.1016/0924-2716\(96\)00018-4](https://doi.org/10.1016/0924-2716(96)00018-4)
25. *Wu W., Sun X., Wang X.* et al. A long time-series radiometric normalization method for Landsat images // *Sensors*. 2018. Vol. 18. P. 4505. <https://doi.org/10.3390/s18124505>
26. *Paolini L., Grings F., Sobrino J.A.* et al. Radiometric correction effects in Landsat multi-date/multi-sensor change detection studies // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, No. 4. P. 685–704. <https://doi.org/10.1080/01431160500183057>
27. *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. P. 1025–1036. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.013>
28. *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, No. 19. P. 3990. <https://doi.org/10.3390/rs13193990>
29. *Xu H., Wei Y., Li X.* et al. A novel automatic method on pseudo-invariant features extraction for enhancing the relative radiometric normalization of high-resolution images // *International Journal of Remote Sensing*. 2021. Vol. 42, No. 16. P. 6153–6183. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1934912>
30. *Kornienko S.G.* Radiometric normalization of Landsat thermal imagery for detection of tundra land cover changes: experience from West Siberia // *International Journal of Remote Sensing*. 2021. Vol. 42, No. 4. P. 1420–1449. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1832280>
31. *Kornienko S.G.* Characteristics of anthropogenic transformations of landscapes in the area of Bovanenkovo gas field based on Landsat satellite data // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2022. Vol. 19, No. 2. P. 106–129. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129> (In Russ.)
32. *Nelson P.R., Maguire A.J., Pierrat Z.* et al. Remote sensing of tundra ecosystems using high spectral resolution reflectance: Opportunities and challenges // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2022. Vol. 127, No. 2. P. e2021JG006697. <https://doi.org/10.1029/2021JG006697>
33. *Kornienko S.G.* Variations of red and near-infrared reflectance and NDVI of tundra vegetation as a function of substrate moisture // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2017. Vol. 14, No. 3. P. 225–234. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-225-234> (In Russ.).