Выявление изменений влажности тундрового почвеннорастительного покрова по данным мультиспектральной космической съёмки (на примере территории строительства завода по сжижению природного газа на полуострове Ямал)

С. Г. Корниенко

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

Актуальность разработки методов крупномасштабного картографирования участков изменения влажности тундрового почвенно-растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли обусловлена необходимостью прогнозирования развития опасных геокриологических процессов вблизи объектов нефтегазового комплекса в криолитозоне. В работе приведены основные положения методики многопараметрического анализа разномасштабных данных космической съёмки для характеристики аномальных изменений влажности тундрового почвенно-растительного покрова. Исследования проводились на территории строительства завода по сжижению природного газа на полуострове Ямал с использованием данных спутников Landsat-8, Ikonos и Planet Scope 2013 и 2017 гг. съёмки. Определены эмпирические зависимости, характеризующие изменения нормализованных дифференциальных индексов растительности (NDVI) и влажности (NDWI), а также коэффициентов отражения в красной и ближней инфракрасной области спектра как функций вариаций температуры поверхности (LST). Выявление участков изменения влажности покрова проводилось по рассчитанным на основе данных спутника Landsat-8 изменениям параметров LST, NDWI и температурно-вегетационному индексу (TVX). Обоснована возможность оценки изменений влажности почвенно-растительного покрова по изменениям индекса NDVI, а также коэффициентов отражения в красной и ближней инфракрасной области, рассчитанных по данным космической съёмки сверхвысокого пространственного разрешения. Показано, что применяемый метод многопараметрического анализа данных космической съёмки позволяет повысить достоверность выявления изменений влажности тундрового почвенно-растительного покрова за счёт снижения влияния случайных факторов.

Ключевые слова: влажность, дистанционное зондирование Земли, коэффициенты отражения, почвенно-растительный покров, спектральные индексы, тундра

Одобрена к печати: 23.08.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-110-119

Введение

Задачи выявления и прогнозирования развития опасных геокриологических процессов (ОГП) в районах расположения объектов нефтегазового комплекса в криолитозоне относятся к числу важнейших в системах геоэкологического и геотехнического мониторинга (Балтабаев и др., 2015). К ОГП относят такие процессы, как термокарст, термоэрозия, заболачивание, подтопление, морозное пучение, солифлюкция, дефляция. Активизация ОГП происходит в результате изменения условий теплообмена мёрзлых грунтов с атмосферой, в первую очередь — при изменении влажности почвенно-растительного покрова (ПРП) в результате нарушения естественных условий поверхностного стока при строительстве объектов (Пендин, Ганова, 2009). В данном случае под ПРП понимается верхний слой земной поверхности, включающий тундровый напочвенный растительный покров, а также нижележащие слои субстрата и грунта. Своевременное выявление участков изменения влажности ПРП вблизи технических объектов позволяет проводить превентивные инженерно-геологические мероприятия, снижающие риск возникновения аварийных ситуаций.

Крупномасштабное картографирование участков вероятной активизации ОГП может проводиться с использованием космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения (КСВР) оптического диапазона. В работе (Laidler et al., 2008) на основе данных наземных измерений и съёмок со спутников Landsat и Ikonos установлено, что в арктических тундрах пространственные вариации индекса NDVI (Normalize Difference Vegetation Index) связаны с влажностью почвы. Исследования на образцах тундрового напочвенного покрова показали, что изменение влажности их субстрата проявляется в вариациях индекса NDVI и коэффициентов отражения в красной (ρ_{KP}) и ближней инфракрасной ($\rho_{БИК}$) области спектра (Корниенко, 2017а). Результаты этих исследований могут служить предпосылками для разработки методики выявления изменений влажности ПРП по изменению параметров NDVI, ρ_{KP} и $\rho_{БИК}$. В то же время нет достаточных доказательств возможности использования КСВР для характеристики изменений влажности ПРП по этим параметрам в реальных условиях. Сложность валидации результатов использования КСВР для этих целей связана с отсутствием или невозможностью получения каких-либо достоверных данных синхронных наземных наблюдений, характеризующих изменение влажности ПРП с детальностью, соизмеримой с данными космической съёмки. Альтернативный подход для валидации — использование близких по датам съёмки с КСВР данных более низкого пространственного разрешения со спутников, имеющих проверенные практикой информативные для характеристики влажности ПРП спектральные каналы. Цель работы — оценка информативности разномасштабных мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) оптического диапазона для характеристики изменений влажности тундрового ПРП в районах строительства и функционирования промышленных и инфраструктурных объектов в криолитозоне.

Основные положения методики исследований

Выявление изменений влажности тундрового ПРП представляет собой частный случай картографического моделирования трансформаций природных ландшафтов криолитозоны на основе многопараметрического анализа мультиспектральных данных ДЗЗ. Прямая задача метода заключается в определении моделей типичных трансформаций природных ландшафтов с использованием имеющихся данных полевых, лабораторных, дистанционных исследований, физического и математического моделирования. К числу типичных трансформаций тундрового ПРП в криолитозоне могут быть отнесены все виды нарушений покрова, вторичные сукцессии, изменения видового состава напочвенного покрова, изменения гидрологических особенностей, температурно-влажностного режима почв и грунтов, деградация и новообразование мерзлоты, проявляемые в ландшафте. Любой из перечисленных типов трансформаций может привести к развитию ОГП. Признаки трансформации определяются по изменениям геоморфологических, гидрологических, геоботанических и теплофизических индикаторов состояния ландшафта.

Модель трансформации представляет собой систему (ряд) параметров, определяемых по мультиспектральным данным, особенности изменений которых характеризует тот или иной тип процесса. К информативным параметрам могут быть отнесены изменения спектральных коэффициентов отражения, а также рассчитываемые на их основе изменения различных индексов. Пример использования данных спутников Landsat для определения многопараметрической модели трансформации тундрового напочвенного покрова на участках пирогенного поражения подробно описан в работе (Корниенко, 2017б). Для построения моделей, характеризующих процесс изменения влажности ПРП, могут быть использованы эмпирические зависимости изменения спектральных коэффициентов отражения и рассчитанных на их основе индексов (Корниенко, 2017а; Quemada, Daughtry, 2016). При решении обратных задач синергетический эффект от использования нескольких информативных параметров позволяет повысить достоверность типизации процесса и, соответственно, более эффективно прогнозировать последствия его развития.

В настоящей работе для выявления изменений влажности тундрового ПРП использовались спектральные коэффициенты отражения ρ_{KP} , ρ_{BUK} , индексы NDVI и NDWI (Normalize Difference Water Index) (Gao, 1996), температура поверхности (Land Surface Temperature, LST) (Van de Griend, Owe, 1993; Weng et al., 2004), а также индекс TVX (Temperature Vegetation Index) (Lambin, Ehrlich, 1995). Границы водоёмов и техногенных объектов определялись методом неконтролируемой классификации мультиспектральных данных. К числу важнейших положений разрабатываемой методики относится системная коррекция временных рядов данных космической съёмки. Основные принципы используемого в настоящей работе способа коррекции приведены в работе (Корниенко, 2017б). Методика оценки изменений влажности ПРП предусматривает применение разномасштабных данных ДЗЗ с близкими датами съёмки, что позволяет повысить достоверность выявления аномальных изменений параметров и детальность их картирования.

В работе были использованы данные спутника Landsat-8 (21.07.2013 и 23.07.2017), а также мультиспектральные КСВР Ikonos (19.07.2013) и Planet Scope (19.07.2017). Пространственное разрешение КСВР (3,2 м) позволяет создавать тематические карты в масштабе 1:5000, что соответствует требованиям геотехнического мониторинга. Обработка и анализ данных космической съёмки проводились с использованием программного комплекса ENVI 5.3. В качестве объекта исследований был выбран район строительства завода по сжижению природного газа (СПГ) площадью около 40 км² вблизи посёлка Сабетта на Южно-Тамбейском нефтегазоконденсатном месторождении (восточное побережье полуострова Ямал). Район расположен на границе арктических и субарктических тундр, характеризуется сплошным распространением многолетнемерзлых пород, полигональным рельефом с повторно-жильными льдами. Напочвенный покров преимущественно мохово-лишайниковый, толщиной 2–3 см, реже встречаются травы и кустарники высотой 20–30 см. На более влажных суглинистых отложениях преобладают мхи, на хорошо дренированных песчаных грунтах — лишайники (Ловчук и др., 1984).

Оценка информативности индекса NDVI и коэффициентов отражения в красной и ближней инфракрасной области для характеристики изменений влажности тундрового почвенно-растительного покрова

На первом этапе выявление изменений влажности ПРП проводилось по наиболее информативным для этой цели параметрам: LST, индексу влажности NDWI, а также по индексу TVX = LST/NDVI. Сравнение распределений изменений параметров LST и NDWI с изменениями ркр, рык и индекса NDVI позволяет косвенно оценить информативность последних трёх параметров для характеристики изменений влажности ПРП, в том числе с использованием КСВР. Анализ проводился на основе данных спутника Landsat-8 с исключением (маскированием) водных поверхностей и техногенных объектов. Предварительно, для уменьшения влияния системных погрешностей, данные 2017 г. съёмки корректировались по данным 2013 г. Значения разности параметров (Δ LST, Δ NDWI, Δ NDVI, $\Delta \rho_{KP}$ и $\Delta \rho_{FMK}$) рассчитывались путём вычитания значений 2013 г. съёмки из корректированных значений 2017 г. съёмки. На рис. 1 (см. с. 113) приведены графики изменений средних значений параметров Δ NDWI, Δ NDVI, $\Delta \rho_{KP}$ и $\Delta \rho_{EVK}$ в зависимости от изменения средних значений параметра ΔLST. Для построения зависимостей между перечисленными параметрами (*puc. 1*) вся область значений параметра Δ LST (при доверительном интервале 99 %) с равномерным шагом разбивалась на 15 градаций (зон). Для каждой зоны определялись средние значения Δ LST, Δ NDWI, Δ NDVI, $\Delta \rho_{KP}$ и $\Delta \rho_{EHK}$ (при доверительном интервале 99 %), на основе которых строились зависимости между Δ LST и остальными параметрами. Увеличение количества влаги в ПРП приводит к повышению его теплопроводности и тепловой инерции, поэтому в дневное время летом на таких участках отмечается снижение LST (отрицательная область значений ΔLST). Повышение значений параметра LST (положительная область значений ΔLST) связывается с дренированием ПРП. При повышении влажности ПРП значения индекса влажности поверхности NDWI, наоборот, увеличиваются.

Полученные зависимости в основном на качественном уровне характеризуют тренды и связи между изменениями этих параметров.



Рис. 1. Графики зависимости средних значений Δ NDWI (*a*), Δ NDVI (*б*), $\Delta \rho_{KP}$ (*в*) и $\Delta \rho_{FUK}$ (*г*) от Δ LST (по данным съёмки со спутника Landsat-8 в 2013 и 2017 гг.)

Подтверждением связи параметров с влажностью ПРП служит график (см. *рис. 1a*), на котором зоны понижения и повышения LST соответствуют зонам повышения и понижения параметра NDWI. Среднее значение индекса NDVI для данной территории — 0,42. Зависимость Δ NDVI от Δ LST (см. *рис. 16*) также однозначно характеризует их связь, причём в данном случае области понижения LST (повышения влажности) соответствуют области повышения LST (повышения влажности) соответствуют области повышения значений индекса NDVI. Зоны повышения LST (дренирования), наоборот, приурочены к участкам снижения индекса NDVI. Эта связь также подтверждается графиками зависимостей $\Delta \rho_{\rm KP}$ и $\Delta \rho_{\rm БИК}$ от Δ LST, когда повышение влажности ПРП характеризуется снижением $\rho_{\rm KP}$ (см. *рис. 1в*) и ростом $\rho_{\rm БИК}$ (см. *рис. 1г*). Такое изменение $\rho_{\rm KP}$, $\rho_{\rm БИК}$ и индекса NDVI при повышении влажности характерно для сфагнового мха (Кринов, 1947) и мха «кукушкин лён» (Корниенко, 2017а). Полученные зависимости показывают, что для данного района изменение влажности ПРП может быть выявлено по вариациям $\rho_{\rm KP}$, $\rho_{\rm БИК}$ и индекса NDVI, в том числе на основе КСВР, имеющим спектральные каналы в красной и ближней инфракрасной (ИК) области.

Картирование участков изменения влажности тундрового почвенно-растительного покрова по данным спутника Landsat-8

На *рис. 2* приведены карты (масштаб 1:50 000) изменения параметров NDVI, NDWI, LST и TVX за период между 2013 и 2017 гг., построенные по данным спутника Landsat-8. Шкала изменений параметров NDVI и NDWI дана в процентах от их динамического диапазона, шкала изменений LST — в Кельвинах (К), шкала изменений индекса TVX — в единицах, соответствующих одному среднеквадратическому отклонению (СКО).



Рис. 2. Изменение параметров NDVI (*a*), NDWI (*б*), LST (*в*) и TVX (*г*) за период с 2013 по 2017 г. (по данным съёмки со спутника Landsat-8)

Для всех параметров область фоновых значений изменений параметров (светло-жёлтый тон) соответствует ± 1 СКО. Область значений в границах ± 2 и ± 3 СКО (зелёные и коричневые тона) характеризует зоны слабого и более сильного изменения параметров соответственно. Карты на *рис. 2а–в* иллюстрируют пространственную связь между параметрами Δ LST, Δ NDWI и Δ NDVI, показанную на *рис. 1а* и *б*.

Участки с нечётными номерами на *puc. 2* характеризуются (преимущественно) повышением значений индексов NDVI, NDWI и понижением значений LST, что соответствует модели повышения влажности ПРП. Участки с чётными номерами, наоборот, характеризуются снижением индексов NDVI, NDWI и повышением значений LST, что более типично для зон дренирования. В соответствии с определением индекса TVX снижение его значений соответствует участкам повышения влажности ПРП (см. *рис. 2г*), а рост связывается с участками дренирования ПРП. Приуроченность изменения параметров NDVI, NDWI, LST и TVX к зонам изменения влажности ПРП может быть подтверждена на примере участка № 1 (см. *рис. 2*). Здесь после строительства дороги, проходящей через хасырей (котловина спущенного водоёма), наблюдается образование нового водоёма, что связано с нарушением существовавших условий поверхностного стока. По той же причине происходит переувлажнение грунтов в хасырее вокруг нового водоёма и вблизи дороги. На участке № 8 создание искусственного водоёма, обнесённого бруствером, не привело к повышению влажности ПРП, что отмечается отсутствием изменений по индексу NDWI, слабым повышением параметров LST, TVX и снижением индекса NDVI.

Валидация результатов выявления изменения влажности почвенно-растительного покрова по космическим снимкам сверхвысокого пространственного разрешения

На *рис. За–в* (см. с. 116) приведены карты изменения параметров NDVI, ρ_{KP} и $\rho_{БИК}$ за период с 2013 по 2017 г., построенные по КСВР спутников Ikonos и Planet Scope, а также распределение параметра NDVI (*рис. Зг*) 2017 г. Как и в предыдущем примере, данные 2017 г. корректировались по данным 2013 г. В данном случае для валидации результатов выявления изменения влажности ПРП по КСВР использовались карты, построенные по данным спутника Landsat-8. Для сопоставления результатов карты, построенные по КСВР, были приведены к масштабу 1:50 000. Даты съёмки со спутников Landsat-8, Ikonos и Planet Scope в 2013 и 2017 гг. отличаются в несколько дней и относятся к периоду после окончания половодья. Близость дат съёмки и отсутствие осадков в эти дни существенно снижает влияние различий фенологических фаз и общей гидрологической ситуации. Сравнение карт изменения индекса NDVI (см. *рис. 2a* и *3a*) показывает практически полное соответствие распределения аномальных зон, в частности по пронумерованным участкам. Таким образом, можно считать, что карта изменения индекса NDVI, построенная по КСВР, в основном характеризует изменение влажности ПРП, также как и карты, построенные по данным Landsat-8.

Сравнение карт изменения индекса NDVI (см. *рис.* 3*a*) и параметров ρ_{KP} и ρ_{FUK} (*рис.* 3*б*, *в*) позволяет уточнить природу изменений индекса NDVI и их связь с изменением влажности ПРП. Показателен в этом отношении тот же участок № 1, где повышение влажности ПРП подтверждается данными Landsat-8. Здесь, вокруг нового водоёма, повышение индекса NDVI произошло не в связи с ростом содержания хлорофилла и объёма зелёной массы, а за счёт различий в снижении ρ_{KP} и $\rho_{БИК}$ (см. *рис. Зб, в*), что, в частности, отмечалось в работе (Корниенко, 2017а). Покров в этом месте характеризуется предельно высокими для тундры значениями индекса NDVI (*puc. 3г*), и, скорее всего, переувлажнение субстрата здесь не сопровождается увеличением объёма зелёной массы. С другой (северной) стороны дороги на участке № 1 повышение индекса NDVI соответствует более типичной ситуации, когда при увеличении влажности субстрата в ПРП отмечается рост содержания хлорофилла и объёма зелёной массы, о чём свидетельствует повышение $\rho_{\text{БИК}}$ и снижение $\rho_{\text{KP}}.$ Похожая ситуация отмечается на участках № 3 (частично), № 5 и 7. На участках дренирования в основном наблюдается обратная картина — понижение индекса NDVI при повышении р_{кр}и снижении р_{БИК}. В данном случае, как отмечалось в работе (Корниенко, 2017а), ρ_{KP} оказался более универсальным (хотя и менее чувствительным) индикатором изменения влажности тундрового ПРП в сравнении с р_{БИК}.



Puc. 3. Изменение параметров NDVI (*a*), ρ_{KP} (*b*) и ρ_{БИК} (*b*) за период с 2013 по 2017 г. по данным съёмки со спутников Ikonos (2013) и Planet Scope (2017) в сопоставлении с распределением параметра NDVI (*e*) в 2017 г. (Условные обозначения приведены на *puc. 2*)

Заключение

Полученные результаты подтверждают возможность оценки изменений влажности тундрового ПРП по изменению параметров NDVI, ρ_{KP} и ρ_{EVK} , рассчитываемых в том числе на основе KCBP. В то же время для оценки изменений влажности ПРП в районах строительства промышленных и инфраструктурных объектов в криолитозоне очевидна более высокая эффективность многопараметрического комплексного анализа данных Д33 среднего и сверхвысокого пространственного разрешения. При характеристике типа трансформации ландшафта использование нескольких наиболее информативных параметров, рассчитанных по данным Д33 среднего пространственного разрешения, позволяет минимизировать влияние случайных факторов. Использование КСВР с датами съёмки, близкими к датам съёмки со спутников среднего пространственного разрешения, позволяет уточнить положение участков наиболее интенсивного изменения влажности ПРП вблизи объектов. В данном случае критерием отбора участков изменения влажности в пределах площади исследований было их соответствие установленным зависимостям между информативными параметрами (см. *рис. 1*). Аномальные несистемные изменения по одному из параметров с меньшей вероятностью могут быть связаны с изменением влажности ПРП, поскольку не исключено влияние случайных факторов или активизация процессов иного типа. В частности, участок аномального понижения LST в нижней части карты (между руслами рек, см. *рис. 2в*) не характеризуется какимилибо аномальными изменениями NDVI, NDWI (см. *рис. 2а, б*) и в данном случае исключался из рассмотрения. Использование комплексных параметров, таких как, например, индекс TVX, также не исключает ошибки, поскольку изменение одной составляющей параметра может не сопровождаться функциональными изменениями других его составляющих. В целом полученные результаты свидетельствуют о возможности выявления участков аномальных изменений влажности тундрового ПРП по мультиспектральным данным ДЗЗ оптического диапазона, включая КСВР, что позволяет использовать их в системах геоэкологического и геотехнического мониторинга, в том числе для прогнозирования развития ОГП вблизи технических объектов.

Автор благодарит компанию «Совзонд» за консультации и помощь в получении космических снимков со спутника Planet Scope.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли» (№ АААА-А16-116022550220-4).

Литература

- 1. Балтабаев Ш.Г., Серебряков Е.П., Лебедев М.С., Лебедева Е.Т. Геотехнический мониторинг Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов // Инженерные изыскания. 2015. № 1. С. 64–69.
- 2. *Корниенко С. Г.* (2017а) Вариации коэффициентов отражения 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.
- 3. *Корниенко С. Г.* (20176) Изучение трансформаций тундрового напочвенного покрова на участках пирогенного поражения по данным спутников Landsat // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 1. С. 93–104.
- 4. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 271 с.
- Ловчук В. В., Никитина Н. Ф., Кондратенко С. Е., Кондратьева Т.А. Отчет по инженерно-геологической съемке Южно-Тамбейской структуры м-ба 1:50 000 на площади 1005 км² в 1981–1984 гг. В 2-х т. Т. 1. Тюмень, 1984. 293 с.
- 6. *Пендин В. В., Ганова С. Д.* Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне. М.: ОАО «ПНИИИС», 2009. 236 с.
- 7. *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.
- 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. V. 61. No. 1. P. 1–13.
- 9. *Lambin E. F., Ehrlich D.* Combining vegetation indices and surface temperature for land-cover mapping at broad spatial scales // Intern. J. Remote Sensing. 1995. V. 16. No. 3. P. 573–579.
- 10. *Quemada M., Daughtry C. S. T.* Spectral Indices to Improve Crop Residue Cover Estimation under Varying Moisture Conditions // Remote Sensing. 2016. V. 8(8). No. 660. 20 p.
- 11. 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.
- 12. 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.

Water content variations in the tundra land cover: evidence from multispectral satellite imagery (a case study of a liquefied natural gas plant construction site, Yamal Peninsula)

S.G. Kornienko

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

Developing methods for large-scale mapping of water content variatons in tundra vegetation and soil using remote sensing is of special importance for predicting geocryological hazard at sites of petroleum production and transportation in permafrost. The paper presents basic principles of multiparametric analysis applied to spaceborne data of different scales in order to detect and characterize anomalous changes in land cover water content. The study was performed at the construction site of a liquefied natural gas plant in the Yamal Peninsula using Landsat-8, Ikonos, and Planet Scope data of 2013 and 2017. The data were used to find empirical relationships that describe the behavior of normalized difference vegetaion and water indexes (NDVI and NDWI, respectively) and reflectance at red and near-infrared wavelengths as a function of land surface temperatures (LST). Zones of water content changes in the tundra land cover were outlined from changes in the LST and in the NDWI and temperature-vegetation (TVX) spectral indexes based on Landsat-8 data. The results prove that NDVI and red and near-infrared reflectance derived from high-resolution satellite imagery can be used as proxies of water content changes in the tundra land cover. The suggested multiparametric analysis of spaceborne data improves the quality of water content variation estimates due to reduction of random effects.

Keywords: water content, remote sensing, reflectance, land cover, spectral index, tundra

Accepted: 23.08.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-110-119

References

- 1. Baltabaev Sh. G., Serebryakov E. P., Lebedev M. S., Lebedeva E. T., Geotekhnicheskii monitoring Yamburgskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya v usloviyakh sploshnogo rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh gruntov (Geotechnical monitoring of Yamburg oil and gas condensate field in conditions of continuous spreading of permafrost soils), *Inzhenernye izyskaniya*, 2015, No. 1, pp. 64–69.
- 2. Kornienko S. G., Variatsii koeffitsientov otrazheniya v krasnoi, blizhnei infrakrasnoi oblasti spectra i indeksa NDVI obraztsov tundrovoi rastitel'nosti v zavisimosti ot vlazhnosti substratov (Variations of red and near-infrared reflectance and NDVI of tundra vegetation as a function of substrate moisture), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 225–234.
- 3. Kornienko S. G., Izuchenie transformatsii tundrovogo napochvennogo pokrova na uchastkakh pirogennogo porazheniya po dannym sputnikov Landsat (Transformation of tundra land cover at the sites of pyrogenic disturbance: studies based on Landsat satellite data), *Kriosfera Zemli*, 2017, Vol. XXI, No. 1, pp. 93–104.
- 4. Krinov E. L., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnykh obrazovanii* (The spectral reflectivity of natural formations), Moscow: Izd. AN SSSR, 1947, 271 p.
- Lovchuk V.V., Nikitina N.F., Kondratenko C.T., Kondrat'eva T.A. Otchet po inzhenerno-geologicheskoi s"emke Uzhno-Tambeiskoi struktury m-ba 1:50 000 na ploshchadi 1005 km² v 1981–1984 gg. v 2-kh tomakh. (Report on engineering-geological survey South-Tambeyskoe structure scale 1:50 000 on the area of 1005 km² in 1981–1984. In 2 vol.), Vol. 1, Tyumen, 1984, 293 p.
- 6. Pendin V.V., Ganova S.D. *Geoekologicheskii monitoring territorii raspolozheniya ob "ektov transporta gaza v kriolitozone* (Geoecological monitoring of territories of location of objects of transport of gas in the permafrost zone), Moscow: OAO PNIIIS, 2009, 236 p.
- 7. 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.
- 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, pp. 1–13.

- 9. Lambin E. F., Ehrlich D., Combining vegetation indices and surface temperature for land-cover mapping at broad spatial scales, *Intern. J. Remote Sensing*, 1995, Vol. 16, No. 3, pp. 573–579.
- 10. Quemada M., Daughtry C.S.T., Spectral Indices to Improve Crop Residue Cover Estimation under Varying Moisture Conditions, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8(8), No. 660, 20 p.
- 11. 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.
- 12. 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.