

Информативность космических снимков сверхвысокого разрешения в задачах мониторинга влажности тундрового покрова

С.Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Аннотация. Обоснована принципиальная возможность использования мультиспектральных космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения для мониторинга влажности тундрового покрова. Результаты анализа спектральных изображений со спутника QuickBird в районе строительства взлетно-посадочной полосы пос. Сабетта (п-ов Ямал) свидетельствуют об очевидной связи коэффициентов отражения в красной ($\rho_{\text{КР}}$) и ближней инфракрасной ($\rho_{\text{БИК}}$) областях с типами местности разной степени дренирования. Возможность оценки изменений влажности тундрового покрова по снимкам высокого разрешения подтверждается результатами верификации изменений $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и индекса NDVI (по данным спутников QuickBird и Ikonos) путем сопоставления с изменениями индекса NDWI, характеризующего влажность покрова (по данным спутников Landsat 7, 8). Показано, что параметр $\rho_{\text{КР}}$ менее чувствителен, однако имеет преимущество перед $\rho_{\text{БИК}}$ и NDVI, поскольку однонаправленно меняется с изменением влажности для любых встречаемых типов поверхности – от обнаженного грунта до развитого напочвенного растительного покрова с любыми реальными значениями индекса NDVI.

Ключевые слова: влажность, космические снимки, коэффициенты отражения, тундровый почвенно-растительный покров, спектральные индексы.

Для цитирования: Корниенко С.Г. Информативность космических снимков сверхвысокого разрешения в задачах мониторинга влажности тундрового покрова // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 82–95. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art7>

Введение

Активизация опасных экзогенных геокриологических процессов (ОГП), таких как термокарст, термоэрозия, подтопление, заболачивание, морозное пучение, дефляция, солифлюкция в районах распространения многолетнемерзлых пород, как правило, связана с изменением условий теплообмена мерзлых грунтов с атмосферой при строительстве и эксплуатации промышленных и инфраструктурных объектов [1]. Изменение влажности грунтов и тундрового почвенно-растительного покрова (ПРП), обусловленное нарушением условий поверхностного и внутripочвенного стока,

относится к числу основных причин развития ОГП. Для проведения превентивных инженерно-геологических мероприятий, снижающих риски возникновения аварийных ситуаций, необходима информация об изменении состояния поверхности, включая изменение влажности ПРП и грунта. Для геотехнического мониторинга и крупномасштабного картографирования участков вероятной активизации опасных геокриологических процессов необходимая детальность съемки может быть обеспечена, в частности, космическими снимками сверхвысокого пространственного разрешения (КСВР) оптического диапазона.

В то же время информативность КСВР для оценки изменений влажности тундрового покрова, субстратов и грунтов изучена не в полной мере. В основном это связано с отсутствием достаточного количества экспериментальных данных, характеризующих связь спектральных характеристик поверхности тундрового ПРП с их влажностью и влажностью субстратов и грунтов. Особенность космических снимков сверхвысокого разрешения оптического диапазона заключается в том, что их спектральные каналы ограничиваются ближней инфракрасной (ИК) областью (длина волны $\lambda < 0,9$ мкм). В этой связи невозможно использование более чувствительных к содержанию влаги спектральных каналов средней и дальней (тепловой) ИК области, а также рассчитанных на их основе спектральных индексов, например, индекса NDWI (Normalize Difference Water Index) [2].

Возможность использования данных красной и ближней ИК области спектра для оценки содержания влаги в поверхностном покрове ранее была рассмотрена в работах [3–7]. В работе [3] на примере территории австралийского континента показана устойчивая связь между вариациями влажности почвы и индекса NDVI (Normalize Difference Vegetation Index), характеризующего содержание хлорофилла в покрове [8]:

$$NDVI = (r_{БИК} - r_{КР}) / (r_{БИК} + r_{КР}), \quad (1)$$

где $r_{КР}$ и $r_{БИК}$ – коэффициенты отражения в красной и ближней ИК области спектра, соответственно.

По результатам наземных наблюдений и съемок со спутников Landsat и Ikonos установлено, что в арктических тундрах индекс NDVI в определенной мере связан с

влажностью почвы [4]. На графике (рис. 1) по оси абсцисс слева направо обозначено расположение участков (Plot) наблюдений по мере увеличения влажности почвы. Несмотря на существенные различия абсолютных значений индекса, рассчитываемых по данным различных средств измерения, из графика видно, что общий тренд характеризует повышение индекса NDVI при увеличении влажности почвы. В то же время для аномально низких (участки P6, P7, P12) и высоких (участки P3, P8, P10) значений влажности и индекса NDVI эта закономерность не соблюдается явно. При повышении влажности живого мха сфагнома $r_{КР}$ уменьшается, а $r_{БИК}$ и, соответственно, NDVI растут [9]. Для некоторых типов тундрового напочвенного растительного покрова, а также песчаного грунта при повышении влажности субстрата и песка значения $r_{КР}$ снижаются, в то время как значения $r_{БИК}$ и NDVI могут повышаться или понижаться в зависимости от типа покрова [6]. Спектральные каналы КСВР с длиной волны менее 0,60 мкм (синяя, зеленая области) менее чувствительны к изменению влажности и их использование для этих целей менее перспективно [9, 10].

В целом, обобщение опубликованных материалов свидетельствует о принципиальной возможности использования каналов красной и ближней ИК области спектра для характеристики влажности тундрового ПРП. В то же время имеющихся экспериментальных данных пока недостаточно для разработки нормативно-методических рекомендаций использования космических снимков сверхвысокого разрешения для крупномасштабного (М 1:5 000) картографирования и мониторинга влажности тундрового покрова и, соответственно, прогнозирования ОГП.

Цель работы – оценка информативности изменений влажности тундрового КСВР красной и ближней ИК ПРП в арктических и субарктических области спектра для характеристики тундрах.

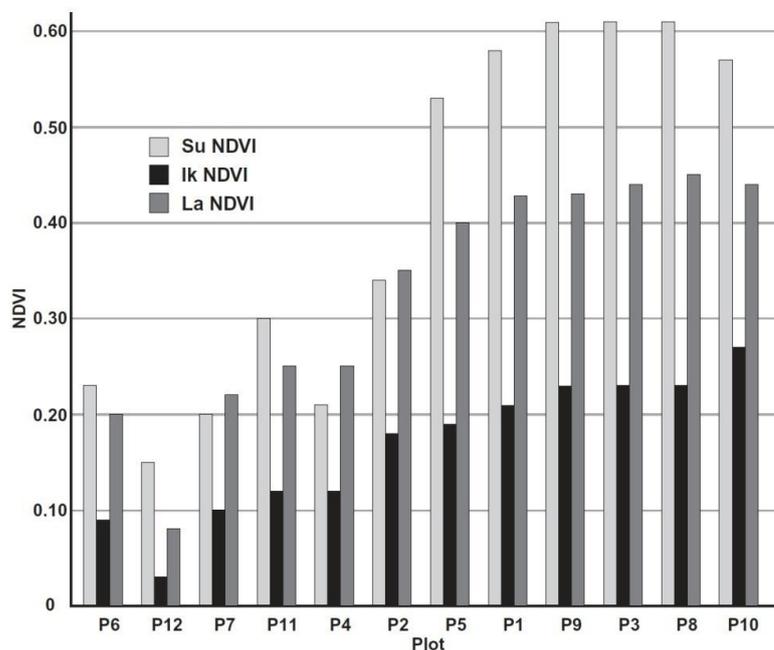


Рис. 1. Связь влажности почвы со значениями NDVI, рассчитанными по данным наземных измерений (Su) и со спутников Ikonos (Ik) и Landsat (La) [4]

Исходные данные, методика и объекты исследований

Для крупномасштабного (М 1:5 000) картографирования состояния ландшафта использовались мультиспектральные снимки спутников QuickBird и Ikonos. Для верифи-

кации результатов их применения дополнительно использовались мультиспектральные снимки со спутников Landsat. В табл. 1 приведены основные характеристики используемых в работе космических снимков и спектральных каналов.

Таблица 1

Используемые космические снимки и спектральные каналы

Космический аппарат	Дата съемки	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м
QuickBird	06.07.2003 г.	0,44–0,90 (панхроматический) 0,63–0,69 (красный); 0,76–0,90 (ближний ИК)	0,61 2,44 –
Ikonos	19.07.2013 г.	0,44–0,90 (панхроматический) 0,64–0,72 (красный); 0,77–0,88 (ближний ИК)	0,82 3,28 –
Landsat 7	06.07.2002 г.	0,63–0,69 (красный); 0,77–0,90 (ближний ИК); 1,55–1,75 (коротковолновый ИК)	30,0 – –
Landsat 8	21.07.2013 г.	0,63–0,68 (красный); 0,84–0,88 (ближний ИК); 1,56–1,66 (коротковолновый ИК)	30,0 – –

Анализ проводился на основе коэффициентов отражения по выбранным спектральным каналам, спектральному индексу NDVI, а также индексу NDWI, рассчитываемому по данным спутников Landsat 7, 8 [2]:

$$NDWI = (\rho_{\text{бик}} - \rho_{\text{кик}}) / (\rho_{\text{бик}} + \rho_{\text{кик}}), \quad (2)$$

где $\rho_{\text{кик}}$ – коэффициент отражения в коротковолновой ИК области спектра (см. табл. 1).

Для оценки изменений (мониторинга) состояния ландшафтов по разновременным космическим снимкам на этапе предварительной их обработки, кроме стандартных процедур калибровки, геометрической коррекции и пространственного совмещения изображений, проводилась их относительная радиометрическая коррекция. Необходимость этого этапа обусловлена тем, что различия спектральных изображений, полученных различными космическими системами в разное время, могут быть связаны не только с изменением состояния ландшафта, но и с другими, системными или случайными факторами. В первую очередь к ним относят различия пропускания атмосферы, времени съемки, калибровочных характеристик. Как правило, эти различия характеризуются линейными изменениями спектральных изображений, что выражается в разнице контрастов и средних значений параметров. Наиболее распространенным способом устранения подобных различий при анализе разновременных мультиспектральных изображений является их относительная радиометрическая коррекция по участкам ненарушенного состояния (псевдо-инвариантным областям) [11, 12]. В подобных методах один

спектральный снимок (изображение) принимается как опорный, а все остальные корректируются (нормализуются) до вида, максимально приближенного к опорному снимку, в частности, с использованием коэффициентов уравнения линейной регрессии [5, 6]. В данном случае расчет коэффициентов уравнения регрессии проводился по участкам ненарушенного (фонового) состояния ландшафтов с различными типами покрова, находящихся на значительном удалении от промышленных и инфраструктурных объектов.

Изменения параметров определялись стандартным методом, по разнице значений более поздней и более ранней даты съемки. Участки аномальных изменений параметров определялись путем маскирования значений, относящихся к участкам изменений ненарушенного фонового состояния ландшафта (с доверительным интервалом 99%) [7].

Границы водных поверхностей определялись по изображениям панхроматических каналов спутников QuickBird и Ikonos также с проведением этапа относительной радиометрической коррекции. Обработка и анализ данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) проводились с помощью программ ENVI 5.3 и MS Excel. В работе использовалась инженерно-геокриологическая карта (ЮЖНИИГИПРОГАЗ, 2012 г.), характеризующая типы местности с разной степенью дренирования.

Анализ данных ДЗЗ проводился на отдельных участках территории строительства завода по сжижению природного газа (СПГ) на Южно-Тамбейском газоконденсатном месторождении (ГКМ) в районе поселка Сабетта.

Строительство завода и объектов инфраструктуры было начато в 2012 г., а в 2017 г. состоялся запуск первой очереди производства сжиженного газа. Само месторождение расположено на восточном берегу полуострова Ямал, на границе арктической и субарктической зон. Район характеризуется сплошным распространением льдистых и малольдистых мерзлых пород, неравномерно дренированными, обводненными и заболоченными плоскими участками [13].

Грунты преимущественно твердомерзлые, представлены супесями, песками, суглинками, глинами и торфом. Микрорельеф мелкопочковатый, пологоволнистый, полигональный. В растительности доминирует низкорослый мохово-лишайниковый покров (2–3 см), реже встречаются травы и кустарники. Растительный покров не сплошной, разорван пятнами минерального грунта. На более влажных суглинистых отложениях преобладают мхи, на хорошо дренированных песчаных грунтах – лишайники.

Характеристика распределений $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и NDVI на участках различной степени дренирования поверхности

На рис. 2 приведены распределения параметров $\rho_{\text{КР}}$ (а), $\rho_{\text{БИК}}$ (б) и индекса NDVI (в), построенные по данным спутника QuickBird в сопоставлении с картой инженерно-геокриологической съемки (г), характеризующей степень дренирования поверхности участка строительства взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэропорта пос. Сабетта. Использование данных QuickBird обусловлено необходимостью характеристики состояния участка до начала строительства ВПП. Распределения

параметров $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и NDVI даны с доверительным интервалом в 99% в 10-ти градациях цвета.

В соответствии с легендой инженерно-геокриологической карты степень дренирования типов местности (мезорельефа) снижается с 1-ого по 5-ый тип, а 6-ой тип отнесен к дренированным морским террасам. По остальным типам (7–10) сведения о характере увлажнения поверхности не представлены. В то же время первые шесть типов местности занимают 92,8% площади (с исключением водоемов) анализируемого участка взлетно-посадочной полосы, что можно считать достаточно представительной выборкой.

На рис. 3 приведена диаграмма распределения средних значений параметров $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и индекса NDVI в границах типов местности в зависимости от степени дренирования их поверхности. Номер типа местности соответствует легенде инженерно-геокриологической карты, представленной на рис. 2. Столбцы, характеризующие значения параметров для типов местности с отсутствием сведений о влажности (7–10) на рис. 3, приведены менее контрастно. Сопоставление данных дистанционного зондирования с типами местности (см. рис. 2 и 3) показывает, что в данном случае дренированные поверхности 1, 6) характеризуются более высокими значениями $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$, а более низкие значения этих параметров приурочены к участкам более влажных поверхностей (3, 4, 5). Анализируемая территория в среднем характеризуется относительно низкими (< 0,3) значениями индекса NDVI и некоторым их снижением при повышении влажности (за исключением 5-ого типа местности).

Этот факт может свидетельствовать о значительной доле открытых грунтов и объясняет снижение $\rho_{\text{БИК}}$ при повышении влажности, что соответствует результатам лабораторных экспериментов

на некоторых образцах тундрового покрова [6]. Значения $\rho_{\text{КР}}$ также снижаются по мере повышения влажности грунтов, но в меньшей степени по сравнению с $\rho_{\text{БИК}}$.

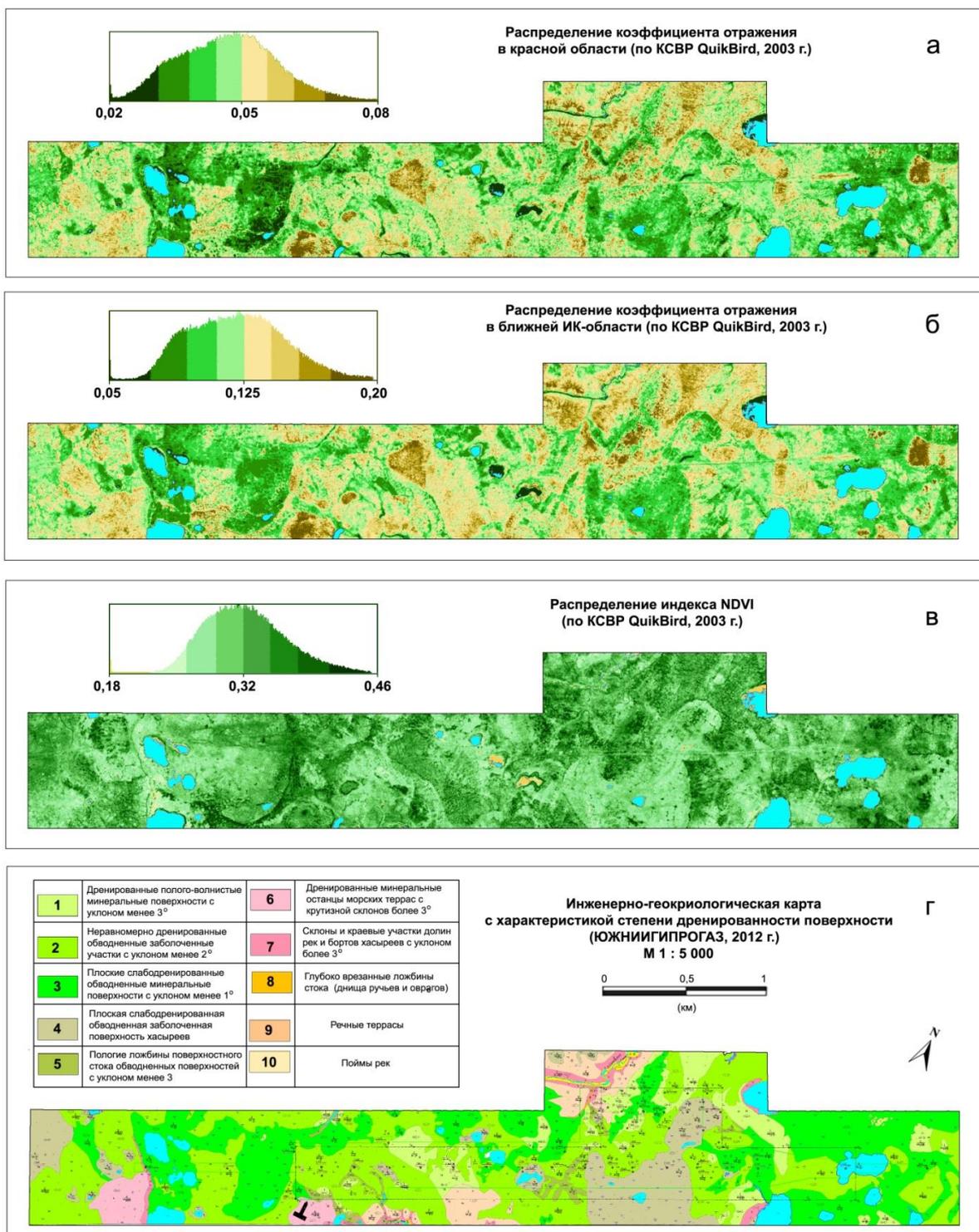


Рис. 2. Распределения $\rho_{\text{КР}}$ (а), $\rho_{\text{БИК}}$ (б) и индекса NDVI (в) в сопоставлении с картой инженерно-геокриологической съемки (г) участка строительства ВПП пос. Сабетта

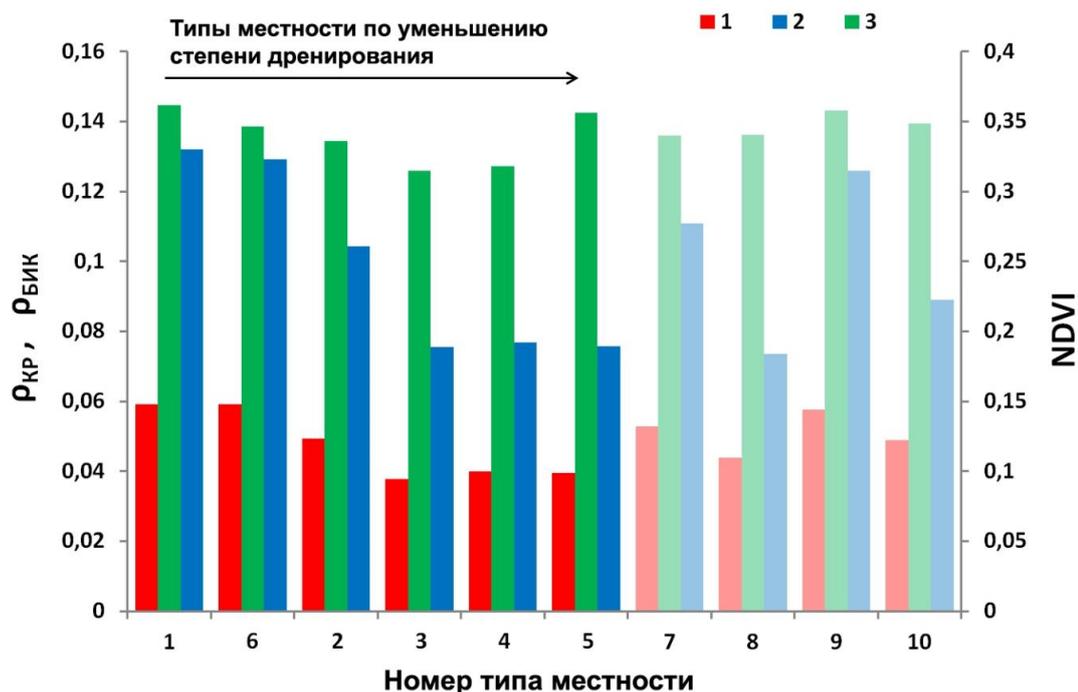


Рис. 3. Средние значения $\rho_{кр}$ (1), $\rho_{бик}$ (2) и индекса NDVI (3) в границах типов местности с разной степенью дренирования поверхности (спутник QuickBird, район строительства ВПП пос. Сабетта)

Речные террасы (тип 9), склоны, краевые участки долин рек и борта хасыреев (тип 7), занимающие 4,8% и 1,9% площади, соответственно, характеризуются относительно высокими значениями $\rho_{кр}$, $\rho_{бик}$ и NDVI, на уровне дренированных поверхностей (типы 1 и 6). Ложбины стока (тип 8) и поймы рек (тип 10) занимают десятые доли процента по площади и приблизительно соответствуют значениям параметров $\rho_{кр}$, $\rho_{бик}$ и NDVI для неравномерно дренированных (тип 2) и слабодренированных (тип 3) поверхностей.

При относительно низких значениях NDVI (< 0,30) вариации этого параметра неоднозначно связаны с влажностью почвенно-растительного покрова, что подтверждается результатами ранее опубликованных исследований [4, 6]. В то же время вариации $\rho_{кр}$ устойчиво связаны с влажностью поверхности при любых значениях индекса NDVI, хотя параметр $\rho_{кр}$

менее чувствителен к изменениям влажности по сравнению с $\rho_{бик}$ и NDVI. Ранее было показано, что, теоретически, по параметру $\rho_{кр}$ (КСВР) изменения относительной влажности тундрового покрова могут быть выявлены на уровне 1% [6].

В целом, полученные результаты могут служить основанием для разработки методики контроля (мониторинга) влажности тундрового напочвенного и растительного покрова с использованием параметров $\rho_{кр}$, $\rho_{бик}$ и NDVI.

Верификация результатов применения КСВР

Сложность верификации результатов применения КСВР для контроля влажности поверхности связана с отсутствием или невозможностью получения каких-либо достоверных данных наземных наблюдений, характеризующих изменение влажности ПРП с необходимой детальностью, соизмеримой с данными космической съемки.

Альтернативный подход – использование близких по датам съемки данных более низкого пространственного разрешения со спутников, имеющих спектральные каналы и индексы, характеризующие вариации влажности покрова, в частности, индекс NDWI [2].

Подтверждением системной связи вариаций параметров NDVI, ρ_{KR} и $\rho_{БИК}$ с изменениями влажности ПРП могут служить результаты сравнений с изменением параметра NDWI, рассчитываемого по данным спутника Landsat. В данном случае было проведено сопоставление аномальных изменений параметра NDWI по данным съемки со спутников Landsat 7, 8 (2002 и 2013 гг.) с изменением NDVI, ρ_{KR} и $\rho_{БИК}$ по снимкам спутников QuickBird (2003 г.) и Ikonos (2013 г.) на различных участках

территории строительства завода СПГ. Фрагмент (а) на рис. 4 иллюстрирует область повышения индекса NDWI за период с 2002 по 2013 гг. вблизи дороги по данным съемки со спутников Landsat 7, 8. На фрагменте (б) показана область аномального повышения индекса NDVI, рассчитанного по снимкам QuickBird и Ikonos. Сравнение фрагментов показывает, что область повышения влажности, выделенная по разности изображений NDWI, практически полностью соответствует области повышения NDVI. В отличие от участка строительства ВПП данная территория характеризуется более развитым сплошным напочвенным растительным покровом и при повышении влажности субстрата увеличивается объем его зеленой массы, что характеризуется относительно высокими значениями индекса NDVI ($> 0,5$) [7].

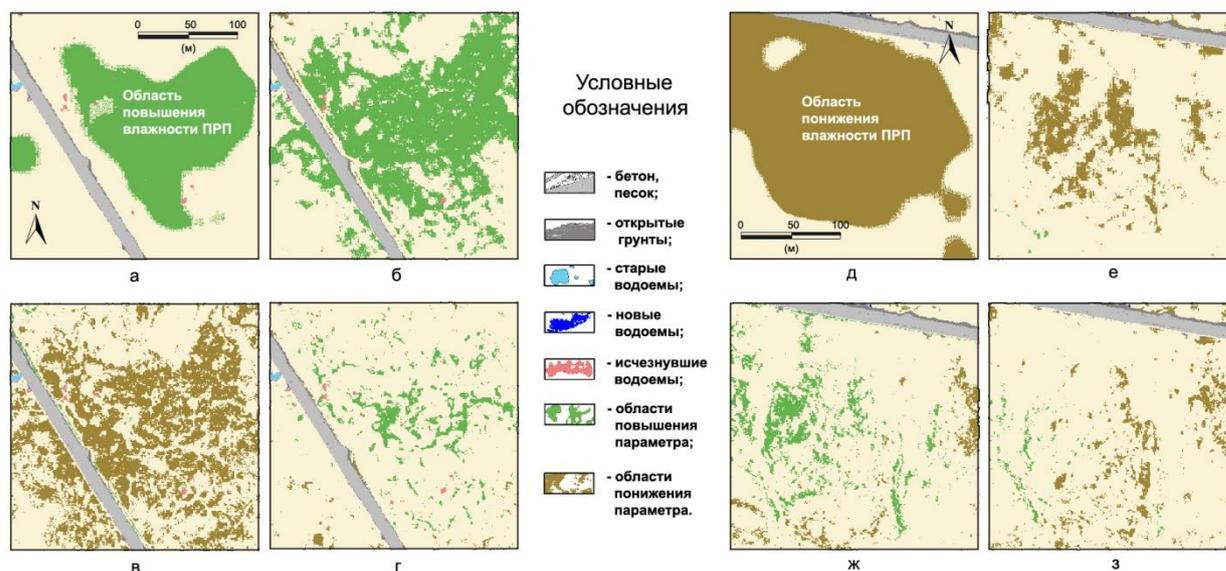


Рис. 4. Связь аномальных изменений индексов NDWI (а, д), NDVI (б, е) и параметров ρ_{KR} (в, ж), $\rho_{БИК}$ (г, з) с повышением (а, б, в, г) и снижением (д, е, ж, з) влажности ПРП

Фрагменты нижнего ряда иллюстрируют обширное понижение значений параметра ρ_{KR} (см. рис. 4, в) и незначительное повышение $\rho_{БИК}$ (см. рис. 4, г), вследствие чего и фиксируется рост параметра NDVI (см. рис. 4, б). Известно, что увеличение

зеленой массы и содержание хлорофилла в растительном покрове, связанное с повышением влажности субстрата, характеризуется повышением $\rho_{БИК}$ в то время как понижение ρ_{KR} в большей степени связано с повышением влажности поверхности.

В подобных случаях оба параметра характеризуют процесс повышения влажности покрова. В то же время, как видно из фрагментов (см. рис. 4, в, г), пространственное распределение зон повышения $r_{\text{БИК}}$ (зеленый тон) приурочены к участкам без изменения $r_{\text{КР}}$ (желтый тон). Подобный факт может быть объяснен наличием в аномальной области двух типов растительности, из которых только один при повышении влажности субстрата увеличивает объем зеленой массы (хлорофилла).

Пример, характеризующий понижение влажности ПРП на соседнем участке, приведен на рис. 4 (д, е, ж, з). Здесь наблюдается обратная картина, соответствующая процессу дренирования грунтов. Область понижения влажности по параметру NDWI (см. рис. 4, д) соответствует области понижения параметра NDVI (см. рис. 4, е). При этом отмечается преимущественное повышение $r_{\text{КР}}$ (см. рис. 4, ж) и незначительное понижение $r_{\text{БИК}}$ (см. рис. 4, з).

Оба примера (см. рис. 4) иллюстрируют ситуацию, когда при изменении влажности покрова изменение индекса NDVI пространственно в большей степени связано с изменением $r_{\text{КР}}$, чем с $r_{\text{БИК}}$, что в данном случае свидетельствует о более высокой информативности параметра $r_{\text{КР}}$ для оценки изменений влажности.

Для некоторых участков аномальное изменение параметров $r_{\text{КР}}$, $r_{\text{БИК}}$ и NDVI может быть приурочено к зонам изменения гидрологической ситуации, а именно к участкам изменения площади водоемов, что может быть косвенным подтверждением связи изменений этих параметров с

изменениями влажности тундрового ПРП. На рис. 5 в качестве примера приведен фрагмент карты изменения состояния водных объектов и параметра $r_{\text{КР}}$ на участке, соседнем с участками, рассмотренными выше (см. рис. 4).

Карта (см. рис. 5) построена по данным спутников QuickBird (2003 г.) и Ikonos (2013 г.). Строительство дорог на этом участке проходило в 2011–2012 гг. Увеличение площади водной поверхности в русле реки в южной части фрагмента (см. рис. 5) и ее уменьшение в северной части свидетельствуют о том, что пропускная способность коллектора под дорогой не соответствует существовавшим естественным условиям поверхностного стока по рельефу (с юга на север). Как следствие, повышение уровня воды в реке приводит к задержке стока и переувлажнению грунтов на прибрежных участках. Обратная картина (дренирование грунтов) может наблюдаться при снижении интенсивности водотока. В южной части преимущественно отмечается понижение значений $r_{\text{КР}}$, что может быть связано с повышением влажности поверхностного покрова вблизи русла реки, а в северной – повышение значений $r_{\text{КР}}$ (понижение влажности). На участках повышения влажности ПРП вблизи дороги наиболее вероятна активизация опасных геокриологических процессов (отмечено красными окружностями). Дренирование поверхности приводит к снижению объемов растительного и почвенного покрова, ослаблению его скрепляющей и теплозащитной роли и, как следствие, к активизации дефляции, выветривания и обнажению поверхностного слоя грунтов.

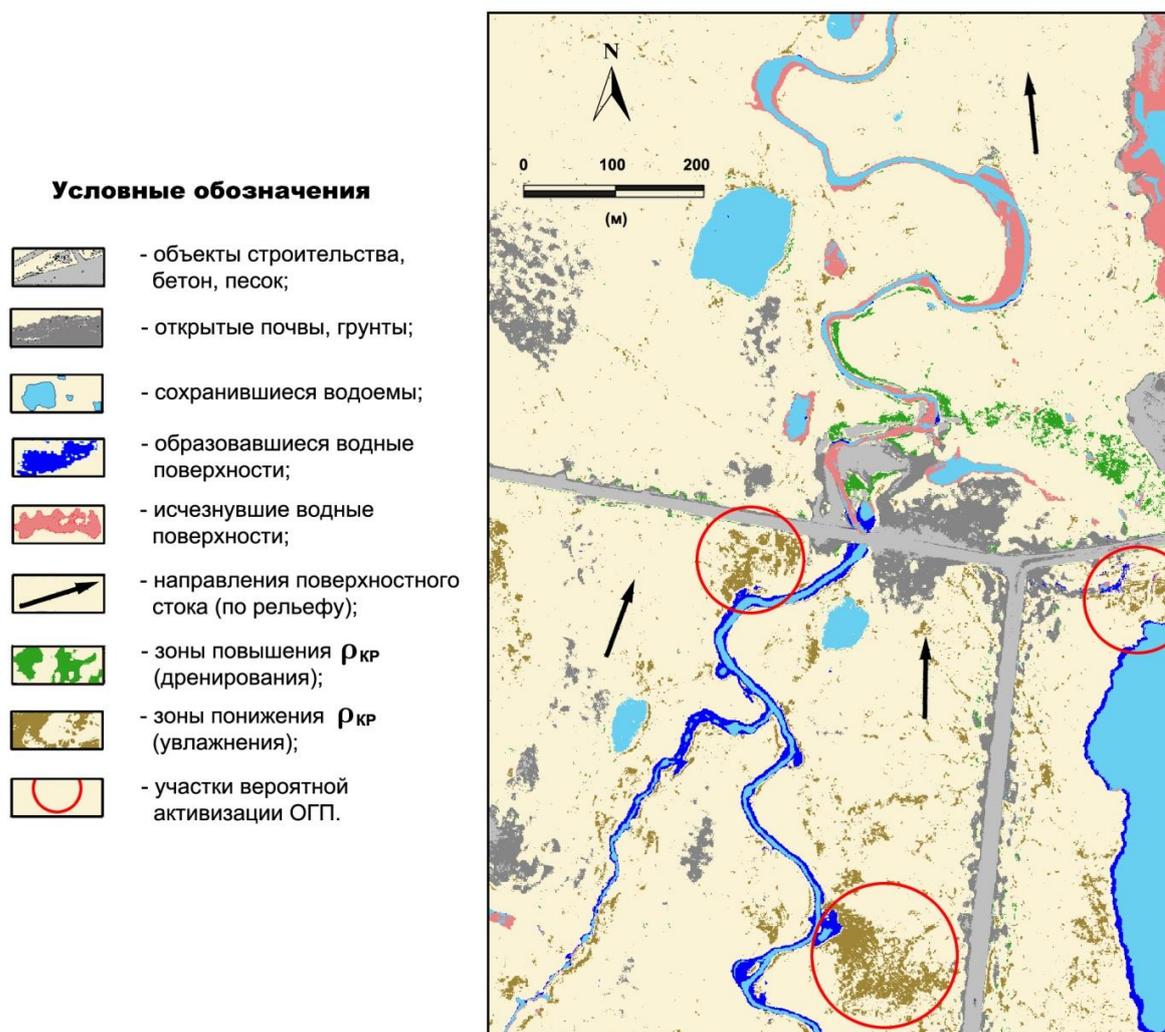


Рис. 5. Фрагмент карты изменения состояния водных объектов, параметра $\rho_{\text{кр}}$ и участков вероятной активизации ОГП в районе строительства завода СПГ на Южно-Тамбейском ГКМ (по КСВР QuickBird, 2003 г., Ikonos, 2013 г.)

Заключение

В целом, полученные результаты подтверждают возможность оценки изменений влажности тундрового почвенно-растительного покрова по изменению параметров $\rho_{\text{кр}}$, $\rho_{\text{бик}}$ и индекса NDVI, рассчитываемых, в том числе, по космическим снимкам сверхвысокого разрешения. Сравнительный анализ информативности спектральных каналов КСВР, проведенный в границах типов местности с разной степенью дренирования, показал, что параметр $\rho_{\text{кр}}$ менее чувствителен к изменениям влажности

поверхности по сравнению с $\rho_{\text{бик}}$ и NDVI. В то же время он имеет преимущество, поскольку, как отмечалось ранее [6], в отличие от них, параметр $\rho_{\text{кр}}$ однонаправленно меняется с изменением влажности для любых типов поверхности – от обнаженного грунта до сплошного тундрового напочвенного растительного покрова (мертвого и живого) с любыми реальными значениями индекса NDVI, что и подтверждается полученными результатами. Повышение влажности поверхности всегда характеризуется снижением значений $\rho_{\text{кр}}$.

Достоверность выявления участков с изменением влажности может быть повышена при комплексном анализе нескольких параметров, в том числе $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и индекса NDVI [7], а также при сопоставлении с другими геоиндикаторами, в частности, с гидрологическим индикатором. Примером может служить приведенная в работе ситуация, когда изменение параметра $\rho_{\text{КР}}$ на участках суши приурочено к изменению площади водной поверхности в русле реки после строительства дорожного полотна.

Накопленный опыт в данном направлении исследований показывает, что использование мультиспектральных космических снимков сверхвысокого разрешения в задачах оценки изменений влажности ПРП позволяет существенно расширить возможности геоэкологического и геотехнического мониторинга, а также прогнозирования развития ОГП в районах строительства и функционирования промышленных и инфраструктурных объектов в криолитозоне.

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

Литература

1. Пендин В.В., Ганова С.Д. Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне. М.: ОАО «ПНИИИС», 2009. 236 с.
2. 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)
3. Chen T., De Jeu R.A.M., Liu Y.Y., Van der Werf G.R., Dolman A.J. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 140. P. 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.022>
4. 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>
5. Корниенко С.Г., Якубсон К.И. Оценка изменений влажности почвенно-растительного покрова в криолитозоне по данным космической съемки сверхвысокого пространственного разрешения // Криосфера Земли. 2016. Т. XX, № 3. С. 113–120. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3\(113-120\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3(113-120))
6. Корниенко С.Г. 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-225-234>
7. Корниенко С.Г. Выявление изменений влажности тундрового почвенно-растительного покрова по данным мультиспектральной космической съемки (на примере территории строительства завода по сжижению природного газа на полуострове Ямал) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 110–119. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-110-119>

8. *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)
9. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 271 с.
10. *Hoffer R.M., Johannsen C.J.* Ecological potential in spectral signature analysis // *Remote Sensing in Ecology* / Ed. by P.L. Johnson. Athens: University Georgia Press. 1969. P. 1–16.
11. *Schott J.R., Salvaggio C., Vochok W.J.* Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features // *Remote Sensing of Environment* 1988. Vol. 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)
12. *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>
13. *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 томах. Т. 1. Тюмень, 1984. 293 с.

Informative value of ultra-high resolution satellite images for monitoring the moisture content of the tundra cover

S.G. Kornienko

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

E-mail: spaceakm2@ogri.ru

Abstract. The article substantiates the fundamental possibility of using multispectral ultra-high spatial resolution satellite images for monitoring the moisture content of the tundra. The results of the analysis of spectral images from the QuickBird satellite in the area of the construction of the runway in the village Sabetta (the Yamal Peninsula) indicate an obvious relationship between the reflectance factors in the red (ρ_{RED}) and near infrared (ρ_{NIR}) regions with the types of terrain of varying degrees of drainage. The possibility of assessing changes in the moisture content of the tundra cover using high-resolution images is confirmed by the results of verifying the changes in ρ_{RED} , ρ_{NIR} and the NDVI index (according to the QuickBird and Ikonos satellites) by comparing with the changes in the NDWI index, which characterizes the cover moisture (according to the Landsat 7, 8 satellites). It is shown that the parameter ρ_{RED} is less sensitive, but it has an advantage over ρ_{NIR} and NDVI, since it changes unidirectionally with the changes in moisture for any encountered types of surface – from bare ground to developed ground vegetation cover with any real values of the NDVI index.

Keywords: water content, space images, reflectance factors, tundra land cover, spectral indices.

Citation: Kornienko S.G. Informative value of ultra-high resolution satellite images for monitoring the moisture content of the tundra cover // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 82–95. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art7> (In Russ.).

References

1. *Pendin V.V., Ganova S.D.* Geocological monitoring of the territories of gas transportation facilities in the permafrost zone. Moscow: PNIIS JSC, 2009. 236 p. (In Russ.).
2. *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)
3. *Chen T., De Jeu R.A.M., Liu Y.Y., Van der Werf G.R., Dolman A.J.* Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 140. P. 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.022>
4. *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>
5. *Kornienko S.G., Yakubson K.I.* Assessment of changes in moisture of soil-vegetation cover in permafrost areas: Evidence from satellite imagery of very high resolution // Kriosfera Zemli. 2016. Vol. XX, No. 3. P. 113–120. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3\(113-120\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3(113-120)) (In Russ.).
6. *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.).

7. *Kornienko S.G.* Water content variations in the tundra land cover: evidence from multispectral satellite imagery (a case study of a liquefied natural gas plant construction site, Yamal Peninsula) // *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018. Vol. 15, No. 5. P. 110–119. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-110-119> (In Russ.).
8. *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)
9. *Krinov E.L.* The spectral reflectivity of natural formations. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1947. 271 p. (In Russ.).
10. *Hoffer R.M., Johannsen C.J.* Ecological potential in spectral signature analysis // *Remote Sensing in Ecology* / Ed. by P.L. Johnson. Athens: University of Georgia Press. 1969. P. 1–16.
11. *Schott J.R., Salvaggio C., Vochok W.J.* Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features // *Remote Sensing of Environment* 1988. Vol. 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)
12. *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>
13. *Lovchuk V.V., Nikitina N.F., Kondratenko C.T., Kondrat'eva T.A.* Report on engineering-geological survey of the South Tambey structure, scale 1:50 000 on the area of 1005 km² in 1981–1984. In 2 vols. Tyumen, 1984. Vol. 1. 293 p. (In Russ.).