

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 528.852.8

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-3(113-120)

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО  
ПОКРОВА В КРИОЛИТОЗОНЕ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ  
СВЕРХВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

**С.Г. Корниенко, К.И. Якубсон**

*Институт проблем нефти и газа РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия; spaceakm2@ogri.ru*

Обоснована возможность использования многозональных космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения для выявления изменений влажности почвенно-растительного покрова в районах арктических и субарктических тундр. Показано, что оценка изменений содержания влаги в почвенно-растительном покрове на участках расположения технических объектов может быть выполнена на основе комплексной интерпретации разновременных изображений в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. В районе аэропорта пос. Сабетта (Южно-Тамбейское газоконденсатное месторождение, восточный берег полуострова Ямал) по космическим снимкам сверхвысокого пространственного разрешения 2003 и 2013 гг. выявлены участки изменения влажности почвенно-растительного покрова, связанного с нарушением условий поверхностного стока при строительстве.

*Влажность, почвенно-растительный покров, космические снимки, арктические и субарктические тундры, криолитозона, поверхностный сток*

**ASSESSMENT OF CHANGES IN MOISTURE OF SOIL-VEGETATION COVER IN PERMAFROST AREAS:  
EVIDENCE FROM SATELLITE IMAGERY OF VERY HIGH RESOLUTION**

**S.G. Kornienko, K.I. Yakubson**

*Oil and Gas Research Institute, RAS, 119333, Moscow, Gubkina str., 3, Russia; spaceakm2@ogri.ru*

The possibility of using the multispectral satellite images of ultra high-spatial resolution to reveal the moisture changes of soil-vegetation cover in Arctic and Subarctic tundra is substantiated. It is demonstrated, that the assessment of changes in the moisture content of the soil-vegetation cover in the areas of location of engineering facilities can be carried out on the basis of integrated interpretation of multi-temporal images in the visible and near-infrared region of the spectrum. On the very high-resolution satellite images of the airport area at Sabetta community (South-Tambey gas condensate field, East coast of the Yamal Peninsula) shot in 2003 and 2013 the sites of changes in the moisture of soil-vegetation cover are identified. This violation is the result of the surface runoff during construction.

*Moisture, soil-vegetation cover, satellite imagery, Arctic and Subarctic tundra, permafrost, surface runoff*

**ВВЕДЕНИЕ**

Освоение нефтегазовых месторождений Арктики и Субарктики связано с повышенными рисками, обусловленными высокой вероятностью развития опасных геокриологических процессов (ОГП), таких как термокараст, термоэрозия, подтопление, заболачивание, морозное пучение, солифлюкция. Причиной активизации ОГП в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), как правило, является изменение условий теплообмена мерзлых грунтов с атмосферой, связанное с нарушением естественного ландшафта, в том числе в результате хозяйственной

деятельности. Строительство дорог, промышленных объектов и объектов инфраструктуры, разъезды тяжелого транспорта приводят к изменению условий поверхностного стока и изменению влажности грунтов деятельного слоя. При увеличении содержания влаги в почвенно-растительном покрове (ПРП) и талых грунтах повышается их теплопроводность и увеличивается мощность сезонноталого слоя.

Под ПРП в данном случае понимаются участки земного покрова, на которых в разных долях площади могут быть представлены открытые поч-

вы, грунты, водные поверхности и растительный покров (РП). Под содержанием влаги в ПРП понимается количество влаги (в объемном или массовом выражении), содержащееся в каждом из указанных компонентов. На участках высокой льдистости мерзлых грунтов и близкого залегания к поверхности пластовых льдов повышение влажности ПРП может служить причиной развития термокарста и термоэрозии. Очевидно, что мероприятия по обеспечению безопасности технических объектов более эффективны при своевременном выявлении участков изменения условий теплообмена, в том числе изменений влажности ПРП, предшествующих ранним стадиям активизации ОГП. Экономический и социальный эффект при своевременной ликвидации причин развития ОГП заключается в снижении затрат на ремонт и восстановление объектов строительства, а также в минимизации техногенного воздействия на природную среду.

В системе геотехнического мониторинга оценка трансформаций ландшафта и контроль за изменением условий теплообмена на поверхности в труднодоступных районах Арктики и Субарктики может эффективно осуществляться на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в первую очередь с использованием космических снимков высокого и сверхвысокого (субметрового) пространственного разрешения (КСВР). Полученные на основе КСВР информационные продукты могут служить важным дополнением к материалам наземной и воздушной съемки, а в ряде случаев стать их альтернативой, в частности, при геотехническом мониторинге магистральных газопроводов [Корниенко и др., 2013]. В этой связи необходима разработка соответствующих методик и алгоритмов обработки КСВР для выявления и прогнозирования ОГП в криолитозоне.

Актуальность научных исследований в этом направлении обусловлена необходимостью совершенствования нормативно-методической базы геотехнического мониторинга на основе обновляемых данных ДЗЗ, обеспечивающих тематическое картографирование в масштабах от 1:5000 и мельче. Существующие сегодня стандарты организаций, в частности, ПАО «Газпром», касающиеся этого вопроса, дают только самые общие представления о порядке проведения работ по выявлению и прогнозированию ОГП на основе данных космической съемки [Методика..., 2008; Методика..., 2010].

Цель настоящей работы – оценка информативности КСВР оптического диапазона для определения изменений влажности ПРП и прогнозирования развития ОГП при строительстве и эксплуатации промышленных объектов и объектов инфраструктуры в арктических и субарктических районах.

## ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработка и апробация методики осуществлялись на примере территории строительства завода по сжижению природного газа в районе пос. Сабетта на Южно-Тамбейском газоконденсатном месторождении (ГКМ), освоение которого производит ОАО «Ямал-СПГ». Месторождение расположено на восточном берегу полуострова Ямал, на границе Арктической и Субарктической зон. Территория характеризуется практически сплошным распространением преимущественно льдистых и малольдистых низкотемпературных ММП с крупными формами подземного льда различного генезиса в верхних горизонтах [Ловчук и др., 1984]. Для территории характерна высокая динамичность развития ОГП, связанных с вытаяванием подземного льда.

В настоящей работе представлены результаты исследования изменений влажности ПРП в районе строительства аэропорта, взлетно-посадочная полоса (ВПП) которого была принята в эксплуатацию в конце 2014 г. Взлетно-посадочная полоса и другие объекты строительства здесь представляют собой типичные ледово-грунтовые сооружения с искусственной песчаной отсыпкой толщиной 1.5–2.5 м. Площадь анализируемой территории в районе аэропорта около 32 км<sup>2</sup>.

Исследуемый район относится к междуречью первой морской террасы с неравномерно дренированными, обводненными и заболоченными плоскими участками [Ловчук и др., 1984]. В инженерно-геологическом плане район представлен верхнечетвертичными и голоценовыми лагунно-морскими отложениями, местами перекрытыми голоценовыми озерно-болотными и болотными осадками. В гипсометрическом плане поверхность участка имеет слабый уклон в восточном направлении, максимальные уклоны не превышают 2°. Озера имеют в основном термокарстовое происхождение. Твердомерзлые грунты представлены супесями, песками, суглинками, глинами и торфом. Микрорельеф – мелкоочковатый, полого-волнистый, полигональный.

В районе развиты арктические, пятнистые и мохово-лишайниковые тундры. Растительный покров преимущественно мохово-лишайниковый толщиной 2–3 см, реже встречаются травы и кустарники высотой 20–30 см. Растительный покров не сплошной, разорван пятнами минерального грунта. На более влажных суглинистых отложениях преобладают мхи, на хорошо дренированных песчаных грунтах – лишайники. Основными почвообразующими породами являются пески, супеси и суглинки различного возраста и генезиса. Торфянисто-глеевые почвы распространены на склонах террас, торфяно-глеевые – в поймах рек и понижениях рельефа.

Температура ММП варьирует в диапазоне от  $-7.1$  до  $-3.8$  °С, средняя  $-4.4$  °С. Мощность сезонноталого слоя колеблется от  $0.2-0.4$  м на торфяниках без воды и до  $0.5-1.2$  м на обводненных болотах. Грунты неоднородны по льдистости, до глубины  $10-15$  м встречаются слабольдистые по всему разрезу, льдистые до глубины  $3-5$  м и льдистые до глубины  $3-5$  м с полигонально-жильными или пластовыми льдами. Льдистость песчаных разностей не превышает  $25-30$  %, в торфах она достигает  $70-80$  %.

### ПОДГОТОВКА ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая особенность представленных на рынке КСВР оптического диапазона состоит в наличии у них панхроматического канала с субметровым ( $0.31-1.0$  м) пространственным разрешением и нескольких ( $3-8$ ) спектральных каналов с пространственным разрешением  $1.24-4.0$  м, перекрывающих видимую и ближнюю инфракрасную (ИК) области спектра электромагнитных волн. Применение специальных алгоритмов, представленных в современных программных комплексах обработки данных ДЗЗ, дает возможность повысить пространственное разрешение изображений в узких спектральных каналах до значений панхроматического канала. Таким образом, использование спектральных каналов КСВР и их комбинаций позволяет создавать тематические карты в масштабе  $1:5\ 000-1:10\ 000$ , что соответствует детальности при решении задач геотехнического мониторинга, в том числе выявления признаков развития ОГП и оценки горно-геологических факторов риска на локальном уровне [Методика..., 2010].

В настоящей работе использовались панхроматические и мультиспектральные КСВР спутников QuickBird и Ikonos, позволяющие характеризовать изменение ландшафта и гидрологических условий до и после строительства объектов. Снимки подобраны с условием полного отсутствия облачности в границах исследуемого района. Обработка и анализ данных космической съемки осуществлялись с использованием программного комплекса ENVI 4.8. Предварительная обработка

снимков включала полный набор радиометрических преобразований, геометрическую коррекцию и преобразование в картографическую проекцию UTM (WGS-84). Для получения количественных значений спектральных коэффициентов отражения ( $\rho$ ) была проведена процедура калибровки изображений по каждому спектральному каналу.

В табл. 1 приведены основные характеристики снимков. Подобранные КСВР практически полностью совместимы по спектральным диапазонам и близки по пространственному разрешению, тем не менее пространственное разрешение снимков космического аппарата QuickBird было масштабировано (снижено) до разрешения снимков Ikonos. В итоге пространственное разрешение снимков с обоих космических аппаратов по всем каналам составило  $0.82$  м.

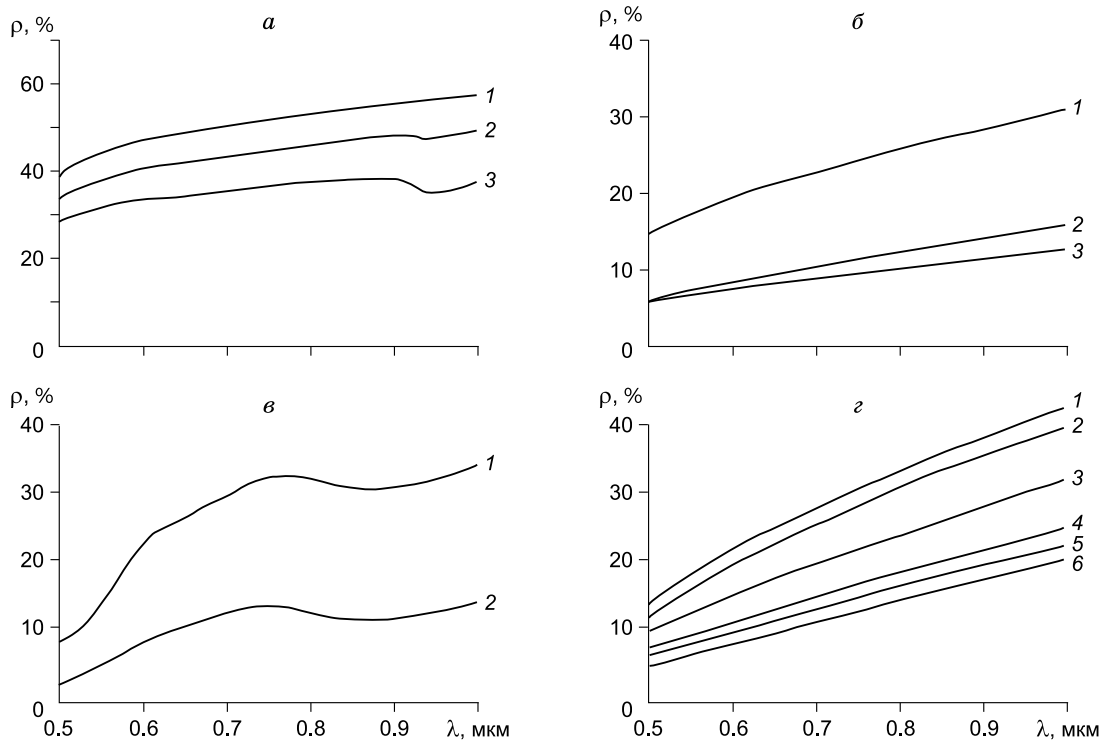
При решении задач, связанных с обнаружением изменений ландшафта по разности изображений разных дат съемки, детальность итогового информационного продукта понижается из-за погрешностей координатной привязки снимков. В данном случае максимальное расхождение координат для одних и тех же объектов по КСВР аппаратов QuickBird и Ikonos составляло  $7$  м. Применение функции перепроецирования изображений Ikonos с привязкой к изображениям QuickBird позволило снизить эту величину до  $3$  м, что приемлемо для построения тематических карт в масштабе  $1:5\ 000$  и мельче.

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Известен опыт применения аэрофотоснимков для оценки проявлений тепловлагопереноса с использованием фотоизображений в различных спектральных диапазонах видимой и ближней ИК-области [Пендин, Ганова, 2009]. Ряд исследований показывает, что для оценки содержания влаги в почве, грунте и РП по данным ДЗЗ оптического диапазона наиболее информативны ближняя и средняя ИК-области спектра [Sims, Gamon, 2003; Jackson et al., 2004; Sadeghi et al., 2015]. На

Таблица 1. Основные характеристики используемых космических снимков

Космический аппарат	Дата съемки	Спектральный диапазон, мкм		Пространственное разрешение, м	
		панхроматический	мультиспектральный	панхроматический	мультиспектральный
QuickBird	06.07.2003 г.	0.445–0.90	0.45–0.52 (синий), 0.52–0.60 (зеленый), 0.63–0.69 (красный), 0.76–0.90 (ближний ИК)	0.61	2.44
Ikonos	19.07.2013 г.	0.445–0.90	0.45–0.52 (синий), 0.52–0.61 (зеленый), 0.64–0.72 (красный), 0.77–0.88 (ближний ИК)	0.82	3.28



**Рис. 1. Зависимости спектрального коэффициента отражения ( $\rho$ ) от длины волны ( $\lambda$ ):**

*a* – кварцевый песок с содержанием влаги: 1 – 0 %, 2 – 9.4 %, 3 – 40.5 % [Tian, Philpot, 2015]; *б* – песчаная почва с содержанием влаги: 1 – 0–4 %, 2 – 5–12 %, 3 – 22–32 % [Hoffer, Johannsen, 1969]; *в* – глинистая почва с содержанием влаги: 1 – 2–6 %, 2 – 35–40 % [Hoffer, Johannsen, 1969]; *г* – пылеватый суглинок с содержанием влаги: 1 – 0.8 %, 2 – 4.7 %, 3 – 8.8 %, 4 – 12.9 %, 5 – 16.9 %, 6 – 20.2 % [Bowers, Hanks, 1965].

рис. 1 приведены кривые коэффициента отражения  $\rho$  для кварцевого песка, песчаных почв, глинистой почвы и пылеватого суглинка с различным содержанием влаги [Bowers, Hanks, 1965; Hoffer, Johannsen, 1969; Tian, Philpot, 2015]. Аналогичные зависимости получены и для других типов почв и грунтов [Справочник..., 1995]. Увеличение влажности образцов приводит к уменьшению значений  $\rho$ , что связано с более интенсивным поглощением водой падающего солнечного света.

На рис. 1 видно, что при изменении влажности образцов на 20–40 % изменение коэффициента отражения в ближней ИК-области ( $\rho^{\text{БИК}}$ ) составляет не менее 20 %. Современные КСВР позволяют регистрировать изменения  $\rho^{\text{БИК}}$  с порогом чувствительности порядка 0.4 %, из чего следует, что, в принципе, изменение влажности аналогичных образцов грунта может быть зафиксировано по КСВР на уровне 1 %.

В настоящее время нет достаточных сведений о зависимости спектральных характеристик видов РП арктических тундр от содержания влаги в них и(или) в почве под ними. В то же время известно, что низкорослая растительность здесь сильно разрежена участками обнаженного грунта. Принимая

во внимание этот факт, а также данные по грунту (см. рис. 1), можно утверждать, что существует принципиальная возможность использования спектрального канала ближней ИК-области для качественной оценки изменений влажности ПРП в исследуемом районе Южно-Тамбейского ГКМ.

При решении обратной задачи (оценка изменений влажности ПРП по вариациям  $\rho^{\text{БИК}}$ ) существует проблема учета природных межгодовых и сезонных изменений влажности ПРП. Кроме того, ошибку вносят различия пропускания атмосферы и фенологических фаз РП, а также погрешности, связанные с калибровкой спектральных каналов. Совокупное влияние этих факторов приводит к изменению спектрально-отражательных характеристик регистрируемых изображений, что, как правило, не позволяет достоверно характеризовать изменения состояния ПРП по снимкам разных дат съемки без специальной их коррекции. Подобная проблема типична при изучении динамики ландшафтов по разновременным данным ДЗЗ, в связи с чем предпринимаются попытки ее решения различными способами в зависимости от поставленной задачи [Плотников и др., 2014; Verbesselt et al., 2010; Zhu, Woodcock, 2014].

В настоящей работе для устранения влияния указанных факторов использован алгоритм системной коррекции КСВР, суть которого состоит в оценке изменений состояния ландшафта на исследуемых участках строительства относительно группы ненарушенных (опорных) участков, находящихся в естественном, стабильном состоянии на значительном удалении. Благодаря высокому пространственному разрешению снимков, участки ненарушенного состояния могут быть выбраны достаточно легко, поскольку фиксируются даже незначительные нарушения ландшафта, включая следы проезда транспорта. Для каждого опорного участка определялись средние значения параметра для пары выбранных изображений и рассчитывались соответствующие регрессионные уравнения, по коэффициентам которых корректировались изображения одного из КСВР. В данном случае корректировались изображения КСВР Ikonos относительно КСВР QuickBird.

На рис. 2 в качестве примера приведен график, характеризующий связь коэффициентов отражения  $\rho_0^{\text{БИК}}$  КСВР Ikonos и QuickBird, построенный по 58 опорным участкам. Погрешность коррекции может быть оценена по статистическим характеристикам распределения разности значений  $\Delta\rho_0^{\text{БИК}}$  по всем опорным участкам (табл. 2).

Изменение значений параметра  $\rho^{\text{БИК}}$  может быть связано не только с влажностью ПРП, но и с изменением площади водных поверхностей, открытых почв и грунтов. В этой связи участки водных поверхностей и изменение их площади, а также бетонные поверхности и песчаные отсыпки определялись методом неконтролируемой классификации IsoDate по КСВР 2003 и 2013 гг. съемки. Для сегментации участков обнаженных почв и грунтов (не классифицированных как пески) размерами больше одного пиксела (минимально различимой площади) и участков с РП использовался чувствительный к содержанию хлорофилла вегетационный индекс  $NDVI = (\rho^{\text{БИК}} - \rho_{\text{к}}) / (\rho^{\text{БИК}} + \rho_{\text{к}})$  [Tucker, 1979], где  $\rho_{\text{к}}$  – коэффициент отражения в “красной” зоне спектра (см. табл. 1). Индекс  $NDVI$  рассчитывался по КСВР от 2013 г., поскольку ос-

новные нарушения ландшафта, связанные со строительством, происходили в 2011–2012 гг. Участки со значением индекса  $NDVI < 0.15$  были отнесены к обнаженным почвам и грунтам без доли РП [Елсаков и др., 2006]. Участки со значением  $NDVI > 0.15$  были отнесены к классу РП. Относительно низкое среднее значение индекса  $NDVI = 0.28$  в классе РП в 2013 г. свидетельствует о существенной доле, занимаемой водными поверхностями (мелкими лужами), обнаженными почвами и грунтами. В дальнейшем вариации параметра  $\rho^{\text{БИК}}$  для оценки изменений влажности ПРП рассматривались только на участках, классифицированных как РП.

Карта изменения влажности ПРП по всему исследуемому району строилась по разности ( $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$ ) изображений в четвертом спектральном канале (ближняя ИК-область) КСВР путем вычитания данных 2003 г. из откорректированных данных 2013 г. съемки. К фоновым значениям  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$  были отнесены значения в границах области  $\Delta\rho_0^{\text{БИК}}$  по опорным участкам. При доверительном интервале 99 % распределения  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$  к фоновым значениям относилось 95 % общей площади исследуемого района (за вычетом водоемов и участков без РП). Из табл. 2 следует, что диапазон значений распределения  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$  в 2 раза превышает диапазон значений этого параметра по опорным участкам. По границам  $\pm 2\text{СКО}$  область значений  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$ , так же как и вся область значений  $\Delta\rho_0^{\text{БИК}}$ , занимала около 95 % площади исследуемого района. Таким образом, информативные значения распределения  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$ , занимающие 5 % площади, попадали в интервалы от  $\pm 3.5$  до  $\pm 7.0$  %. Участки уменьшения значений  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$  определялись как зоны предполагаемого повышения влажности ПРП, а увеличения – как зоны дренирования.

Таблица 2. Статистические характеристики распределений разности коэффициентов отражения по опорным участкам и всему району

Параметр	Диапазон значений, %	СКО, %
$\Delta\rho_0^{\text{БИК}}$	$\pm 3.5$	1.2
$\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$	$\pm 7.0$	1.8

Примечание.  $\Delta\rho_0^{\text{БИК}}$  – разность коэффициентов отражения по ненарушенным опорным участкам;  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$  – разность коэффициентов отражения по исследуемому району; СКО – среднеквадратическое отклонение; доверительный интервал – 99 %.

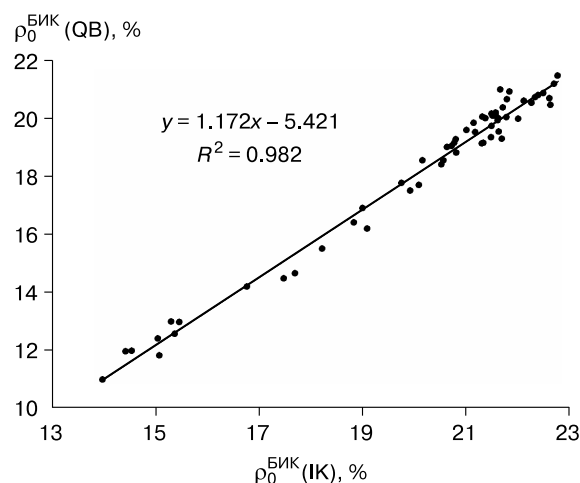


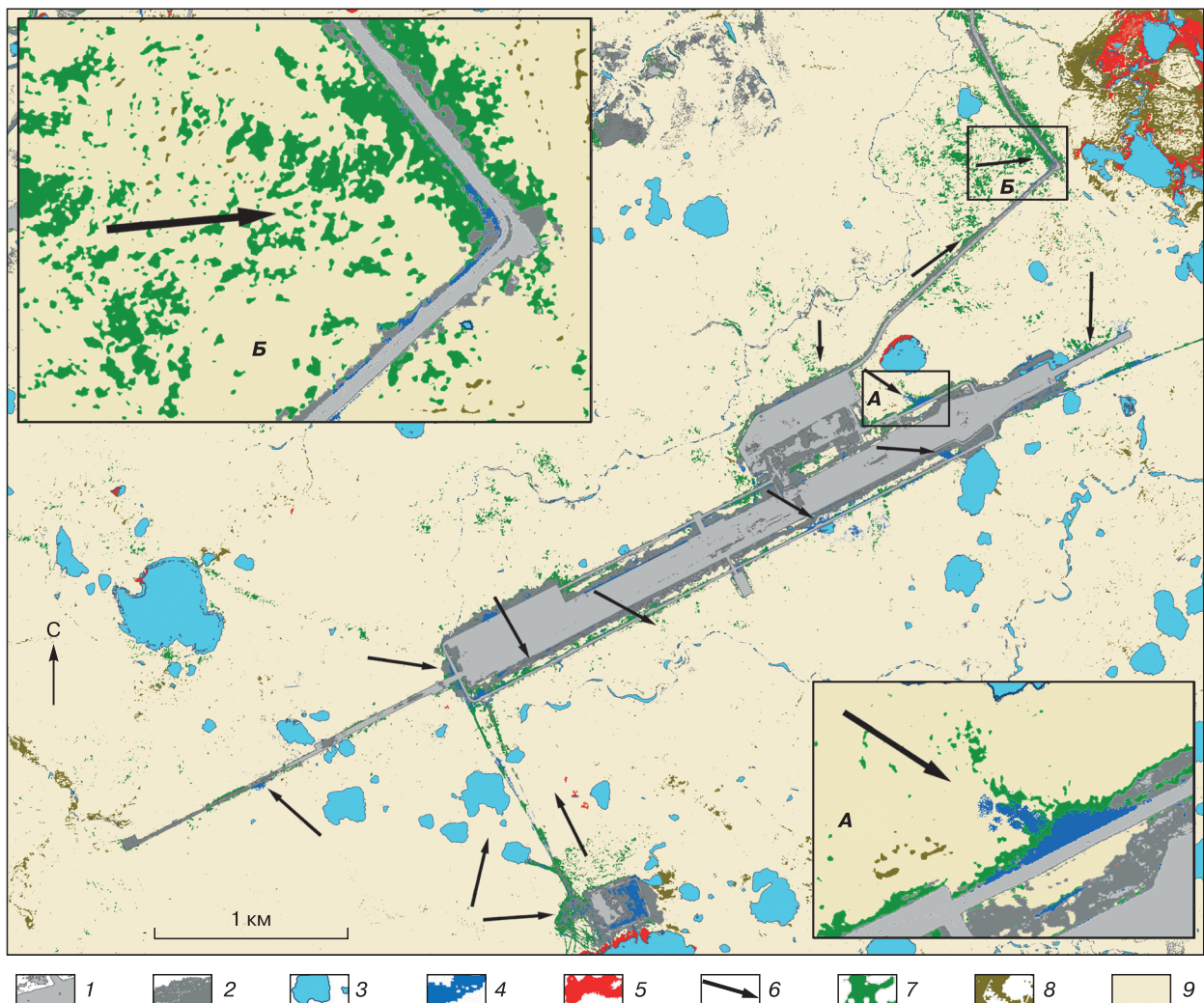
Рис. 2. Связь коэффициентов отражения в ближней ИК-области КСВР Ikonos ( $\rho_0^{\text{БИК}}$  (ИК)) и QuickBird ( $\rho_0^{\text{БИК}}$  (QB)) по 58 ненарушенным опорным участкам.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕНЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

На рис. 3 приведена карта масштаба 1:5 000 с увеличенными фрагментами (А, Б), характеризующая изменение площади водоемов и изменение параметра  $\rho_S^{\text{БИК}}$  в районе аэропорта за период 2003–2013 гг. На карте обозначены участки с бетонным покрытием, песчаной отсыпкой, участки открытых почв и грунтов без РП, участки исчезновения и образования новых водоемов (подтоплений), а также направления поверхностного стока в районе ВПП, преобладавшие до начала строительства. На рис. 3 видно, что участки образования но-

вых водоемов и понижения  $\rho_S^{\text{БИК}}$ , предположительно связанного с увеличением влажности ПРП, в основном сосредоточены по периметру элементов ВПП и примыкающей к ней дороги, в то время как участки повышения  $\rho_S^{\text{БИК}}$  (дренирования ПРП) здесь практически отсутствуют. Приуроченность участков понижения значений параметра  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$  к новым водоемам вблизи ВПП и ведущей к ней дороги свидетельствует о неслучайном характере его распределения и о его связи с влажностью ПРП.

Сложность прямой валидации методики связана с отсутствием или недоступностью каких-либо достоверных данных, характеризующих про-



**Рис. 3.** Карта изменения площади водоемов и влажности почвенно-растительного покрова в районе аэропорта пос. Сабетта.

1 – бетонные поверхности, пески; 2 – почвы и грунты без растительности; 3 – сохранившиеся водоемы; 4 – участки образования новых водоемов; 5 – участки сокращения площади водоемов; 6 – направления поверхностного стока; 7 – участки anomalно низких значений  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$  (повышения влажности почвенно-растительного покрова); 8 – участки anomalно высоких значений  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$  (дренирования почвенно-растительного покрова); 9 – участки фоновых значений  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$  (без изменений влажности покрова).

странственную неоднородность влажности ПРП или ее динамику в арктических тундрах. Доказательством того, что параметр  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$  характеризует изменение влажности ПРП, могут служить аномально высокие его значения на участке крупного хасырея в верхнем правом углу карты (см. рис. 3). Известно, что в районах Центрального Ямала сход талой воды и сокращение площади водоемов могут продолжаться до середины июля [Корниенко, 2014]. Более обводненная зона хасырея дренируется позже остальных участков, в том числе позже других, более мелких хасыреев. Об этом свидетельствует аномальное сокращение площади водоемов в контурах крупного хасырея. Поскольку КСВР 2003 г. был сделан 6 июля, а КСВР 2013 г. – 19 июля, аномально высокие значения  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$  в районе хасырея могут быть связаны только с запоздалым снижением влажности ПРП. В хасырее не ведутся строительные работы и не отмечены площадные нарушения ландшафта, поэтому здесь не может быть каких-либо иных причин повышения значений  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}}$ , кроме уменьшения влажности ПРП. Сокращение площади водоемов и уменьшение влажности ПРП в хасырее может быть связано также со снижением подтока воды, поступавшей с запада и скопившейся в районе поворота дороги после ее строительства. Обстоятельство, связанное со сходом талой воды, не распространяется на обозначенные участки предполагаемого увеличения влажности ПРП, поскольку от фактора времени в данном случае зависит только снижение влажности ПРП, но никак не ее повышение.

Полученный результат дает качественную картину предполагаемых изменений влажности ПРП в районах с низкорослой растительностью, разреженной участками обнаженного грунта, и позволяет определить местоположение участков увлажнения и дренирования по косвенному признаку – изменению коэффициента отражения в ближней ИК-области. Если принять во внимание данные рис. 1, то полученные по КСВР максимальные значения  $\Delta\rho_S^{\text{БИК}} = \pm 7\%$  приблизительно могут соответствовать изменению влажности ПРП от  $\pm 3$  до  $\pm 10\%$  в зависимости от объемного содержания влаги.

Поскольку основное строительство ВПП было начато в 2012 г., можно предположить, что все выявленные по КСВР изменения площади водоемов и влажности ПРП произошли за один год, скорее всего, в результате изменения естественного поверхностного стока. Проект строительства протяженных объектов в подобных условиях обязательно должен предусматривать систему дренирования, однако даже при ее наличии сложно добиться необходимого стока без образования подтоплений. В этой ситуации при обнаружении участков повышения влажности ПРП на основе

КСВР могут приниматься адресные инженерно-геологические меры, снижающие вероятность развития ОГП. Высокая детальность изображений КСВР дает возможность уверенно идентифицировать структурные особенности криогенных ландшафтов, в том числе полигонально-жилые структуры, что в комплексе с картами изменения влажности ПРП позволяет прогнозировать тип возможных ОГП. В частности, в северо-восточной части ВПП грунты характеризуются высокой льдистостью, и здесь на участках повышения влажности ПРП более вероятно развитие термокарстовых процессов [Ловчук и др., 1984].

В настоящее время насчитывается около полутора десятков функционирующих космических аппаратов, включая отечественный “Ресурс-П”, обеспечивающих мультиспектральную съемку земной поверхности в оптическом диапазоне со сверхвысоким пространственным разрешением. Несмотря на малое количество безоблачных дней в году на этих широтах, растущее число космических аппаратов с аппаратурой подобного типа позволяет рассчитывать на получение как минимум одного КСВР за июль или август каждого года, что может служить основанием для организации аналогичных систематических ежегодных наблюдений. Кроме того, на базе существующих архивных КСВР может быть получена дополнительная информация, характеризующая динамику криогенных ландшафтов, изменение влажности ПРП и вероятность развития ОГП, в том числе на трассах магистральных газопроводов.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования свидетельствуют о принципиальной возможности использования изображений в ближней ИК-области КСВР для характеристики изменений влажности почвенно-растительного покрова в арктических тундрах с низкорослой растительностью, разреженной участками обнаженного грунта.

Основные положения методики оценки изменений влажности ПРП по КСВР включают:

- предварительную обработку КСВР;
- системную коррекцию разновременных спектральных изображений КСВР;
- построение изображений и карт, характеризующих трансформации ландшафта и изменение коэффициента отражения в ближней ИК-области;
- определение области информативных значений анализируемых параметров;
- определение участков изменения влажности ПРП на основе комплексной интерпретации карт трансформации ландшафта и изменений коэффициента отражения в ближней ИК-области.

По КСВР 2003 и 2013 гг. съемки в районе аэропорта пос. Сабетта (Южно-Тамбейское ГКМ) выявлены участки предполагаемого изменения

влажности ПРП, связанного с изменением условий поверхностного стока при строительстве ВПП.

Обоснована возможность организации систематических ежегодных наблюдений для оценки изменений влажности ПРП и прогнозирования опасных геокриологических процессов на участках расположения технических объектов в труднодоступных районах криолитозоны с использованием КСВР.

Работа выполнена в рамках проекта “Экологическая и промышленная безопасность при освоении нефтегазовых ресурсов Арктики” программы Президиума РАН “Поисковые и фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны РФ”.

### Литература

- Елсаков В.В., Плюснин С.Н., Щанов В.М.** Технологии дистанционного зондирования в исследовании свойств растительных сообществ в бассейне р. Новая Нерута // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. статей. М., ООО “Азбука-2000”, 2006, вып. 3, т. II, с. 315–319.
- Корниенко С.Г.** Оценка погрешности измерения площади водоемов в криолитозоне по данным космической съемки различного пространственного разрешения // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 4, с. 86–93.
- Корниенко С.Г., Якубсон К.И., Дубровин В.А. и др.** Аэрокосмический геокриологический мониторинг трассы газопровода “Бованенково–Байдарацкая губа” // Газ. пром-ть, 2013, № 7, с. 24–27.
- Ловчук В.В.** Отчет по инженерно-геологической съемке Южно-Тамбейской структуры м-ба 1:50 000 на площади 1005 км<sup>2</sup> в 1981–1984 гг. / В.В. Ловчук, Г.В. Ловчук, Н.Ф. Никитина, С.Е. Кондратенко, Т.А. Кондратьева. Тюмень, 1984, т. 1, 293 с.
- Методика** проведения геокриологических исследований при разведке и разработке месторождений. СТО Газпром 2-3.1-233-2008. М., ОАО “Газпром”, 2008, 115 с.
- Методика** проведения космического мониторинга состояния территорий горных отводов для обеспечения промышленной безопасности при добыче и хранении нефти и газа. СТО Газпром 2-3.1-439-2010. М., ОАО “Газпром”, 2010, 40 с.
- Пендин В.В.** Геозекологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне / В.В. Пендин, С.Д. Ганова. М., ПНИИИС, 2009, 236 с.
- Плотников Д.Е., Миклашевич Т.С., Баргалева С.А.** Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Соврем. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014, т. 11, № 2, с. 103–110.
- Справочник** по инфракрасной технике / Ред. У. Вольф, Г. Цитис: Пер. с англ. М., Мир, 1995, т. 1, 606 с.
- Bowers S.A., Hanks R.J.** Reflection of Radiant Energy from Soil // Soil Science, 1965, vol. 100, p. 130–138.
- Hoffer R.M., Johannsen C.J.** Ecological potential in spectral signature analysis // Remote Sensing in Ecology / P.L. Johnson (ed.). Athens, Univ. Georgia Press, 1969, p. 1–16.
- Jackson T.J., Chen D., Cosh M. et al.** Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans // Remote Sensing of Environ., 2004, vol. 92, p. 475–482.
- Sadeghi M., Jones S.B., Philpot W.D.** A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands // Remote Sensing of Environ., 2015, vol. 164, p. 66–76.
- Sims D.A., Gamon J.A.** Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features // Remote Sensing of Environ., 2003, vol. 84, p. 526–537.
- Tian J., Philpot W.D.** Relationship between surface soil water content, evaporation rate, and water absorption band depths in SWIR reflectance spectra // Remote Sensing of Environ., 2015, vol. 169, p. 280–289.
- Tucker C.J.** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environ., 1979, vol. 8, p. 127–150.
- Verbesselt J., Hyndman R., Newnham G. et al.** Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series // Remote Sensing of Environ., 2010, vol. 114, p. 106–115.
- Zhu Z., Woodcock C.E.** Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data // Remote Sensing of Environ., 2014, vol. 144, p. 152–171.

Поступила в редакцию  
11 июня 2015 г.