

Вариации коэффициентов отражения в красной, ближней инфракрасной области спектра и индекса NDVI образцов тундровой растительности в зависимости от влажности субстратов

С.Г. Корниенко

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

В статье приведены экспериментальные данные, характеризующие вариации коэффициентов отражения в красной и ближней инфракрасной (ИК) области спектра, а также индекса NDVI образцов тундровой растительности и супесчаного грунта в зависимости от объемного содержания влаги в субстрате и грунте. При повышении влажности субстрата образца живого мха отмечается рост индекса NDVI, повышение коэффициента отражения в ближней ИК области и его снижение в красной области спектра. Для образцов живой низкорослой кустарничково-лишайниково-травянистой растительности и неживого мха при повышении влажности субстрата отмечен рост индекса NDVI и снижение коэффициентов отражения в обоих спектральных каналах. При повышении влажности супесчаного грунта коэффициенты отражения в обоих спектральных каналах и индекс NDVI снижаются. Полученные данные свидетельствуют о том, что вариации индекса NDVI тундровой растительности не всегда могут быть связаны с изменением объема зеленой массы и содержанием хлорофилла. Показано, что достоверность обнаружения изменений влажности субстратов по данным космической съемки сверхвысокого разрешения может быть повышена при комплексной интерпретации вариаций индекса NDVI и коэффициентов отражения в красной и ближней ИК области спектра.

Ключевые слова: коэффициент отражения, влажность субстрата, индекс NDVI, тундровая растительность, супесчаный грунт

*Одобрена к печати: 07.02.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-225-234*

Введение

Активизация опасных экзогенных геокриологических процессов (ОГП), таких как термокарст, термоэрозия, подтопление, заболачивание, морозное пучение и др., в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород, как правило, связана с изменением условий теплообмена мерзлых грунтов с атмосферой при строительстве и эксплуатации промышленных и хозяйственных объектов (Пендин, Ганова, 2009). Изменение влажности субстратов напочвенных покровов (НП), обусловленное нарушением условий поверхностного и внутрпочвенного стока, относится к числу основных причин развития ОГП. Своевременное выявление участков изменения влажности НП и грунтов вблизи технических объектов позволяет принимать превентивные инженерно-геологические мероприятия, снижающие риск возникновения аварийных ситуаций. Для геотехнического мониторинга и крупномасштабного картирования участков вероятной активизации ОГП необходимая детальность съемки может быть обеспечена, в частности, космическими снимками сверхвысокого пространственного разрешения (КСВР) оптического диапазона. В то же время возможности использования КСВР для оценки изменений влажности НП, субстратов и грунтов изучены не в полной мере. В основном это связано с отсутствием достаточного количества экспериментальных данных, характеризующих связь спектральных характеристик поверхности НП с влажностью субстратов. Особенность КСВР оптического диапазона заключается в том, что их спектральные каналы ограничиваются ближней

инфракрасной (ИК) областью. 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 (Sadeghi et al., 2015). Цель работы – исследование вариаций коэффициентов отражения тундровой растительности в красной и ближней ИК области при изменении влажности субстрата и грунта.

Методика исследований

Для оценки содержания влаги в НП могут быть использованы данные красной и ближней ИК-области спектра, а для растительности, в частности, рассчитанный на их основе спектральный индекс NDVI (Huemmrich et al., 2010; Chen et al., 2014; Laidler et al., 2008; Sadeghi et al., 2015). Индекс NDVI = $(\rho_{\text{БИК}} - \rho_{\text{КР}}) / (\rho_{\text{БИК}} + \rho_{\text{КР}})$, где $\rho_{\text{КР}}$ и $\rho_{\text{БИК}}$ – коэффициенты отражения поверхности на длинах волн (λ) в красной (0,63–0,72 мкм) и ближней ИК (0,76–0,9 мкм) области спектра, соответственно. Индекс эффективен при характеристике содержания хлорофилла в растительном покрове, поскольку его изменение существенно влияет на отражение солнечного света в красной и ближней ИК-области.

В работе (Chen et al., 2014) на примере территории австралийского континента показана устойчивая связь между пространственными и временными вариациями влажности почвы и индекса NDVI. В работе (Laidler et al., 2008) на основе данных наземных измерений и съемок со спутников Landsat и Ikonos показано, что в арктических тундрах площадь проективного покрытия растительностью, объем ее зеленой массы и индекс NDVI связаны с влажностью почвы. Результаты этих исследований свидетельствуют о принципиальной возможности разработки методики для характеристики изменений влажности почв и грунтов в арктических и субарктических тундрах на основе КСВР. Вариации индекса NDVI при изменениях влажности почвы объясняются исключительно изменением содержания хлорофилла и объема зеленой массы в НП. В то же время изменение индекса может быть связано с изменением $\rho(\lambda)$ в одном из спектральных каналов или с однонаправленным изменением в обоих каналах и не имеет связи с содержанием хлорофилла. В первую очередь это относится к участкам (в т.ч. смешанным пикселям) с относительно низкими значениями индекса NDVI, включающим мертвый растительный покров, обнаженные почвы, грунты, а также низкорослую разреженную растительность.

Особый класс НП в арктических и субарктических тундрах составляют лишайники разных видов, для которых, как следует из работы (Елсаков, Поликарпова, 2015), нет единой закономерной связи между $\rho(\lambda)$ и влажностью таллома. Особенность лишайников состоит в том, что в отличие от мхов и сосудистых растений их влажность больше зависит от влажности воздуха, чем от влажности субстрата. В настоящее время нет данных, подтверждающих возможность использования $\rho(\lambda)$ и индекса NDVI для характеристики влажности субстратов кустистых лишайников. В то же время тундровые лишайники

характеризуются низкими значениями индекса NDVI (в среднем 0,20) и относительно высокими значениями коротковолнового альbedo, что позволяет уверенно отделять их по мультиспектральным космическим снимкам от других типов НП.

На рис. 1 приведены зависимости $\rho(\lambda)$ от влажности для сфагнового мха (а), песчаных (б) и глинистых (в) почв, а также пылеватого суглинка (г). При повышении влажности сфагнового мха индекс NDVI будет существенно увеличиваться (рис. 1а). Для образцов грунта повышение их влажности приводит к снижению $\rho_{\text{КР}}$ и $\rho_{\text{БИК}}$ (рис. 1б, в, г), причем более существенно $\rho_{\text{БИК}}$. На других длинах волн видимого диапазона коэффициенты отражения $\rho(\lambda)$ менее чувствительны к изменению влажности грунтов. Для образцов грунта связь индекса NDVI с влажностью незначительна и неоднозначна. При повышении влажности песчаной почвы и пылеватого суглинка отмечается слабый рост индекса NDVI, а для глинистой почвы незначительное его снижение.

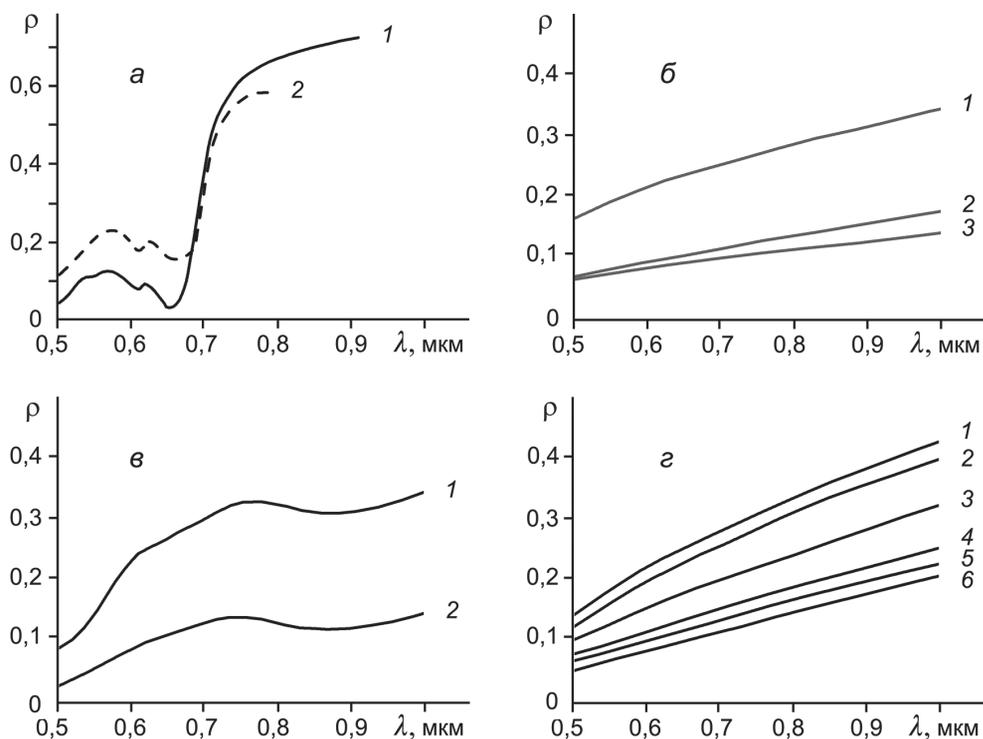


Рис. 1. Кривые зависимости $\rho(\lambda)$ от влажности: а) – сфагнового мха: 1 – влажного, 2 – сухого (Кринов, 1947); б) – песчаных почв с содержанием влаги: 1 – 0–4%, 2 – 5–12%, 3 – 22–32% (Hoffer, Johannsen, 1969); в) – глинистой почвы с содержанием влаги: 1 – 2–6%, 2 – 35–40% (Hoffer, Johannsen, 1969); г) – пылеватого суглинка с содержанием влаги: 1 – 0,8%, 2 – 4,7%, 3 – 8,8%, 4 – 12,9%, 5 – 16,9%, 6 – 20,2% (Bowers, Hanks, 1965)

Для получения дополнительной информации о связи $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и индекса NDVI пространственных в тундре типов НП с влажностью их почвенных субстратов были проведены лабораторные эксперименты с использованием установки, включающей два контейнера размерами 25×25×35 см для образцов НП и систему сбора данных (Decagon Devices Inc., США). В состав измерительной системы входят два датчика для регистрации отраженного излучения на длинах волн 630 нм (красная область) и 800 нм (ближняя ИК-область)

с углами обзора 20° , полусферический датчик падающего излучения на этих же длинах волн, два датчика объемного содержания влаги в почвенном субстрате и пятиканальный регистратор данных. Система может работать в автономном режиме, управление системой и съем данных осуществляется с помощью подключаемого к регистратору ноутбука с использованием специального программного обеспечения.

Для сопоставления с данными других исследований регистрируемые значения отношения отраженного и падающего потока излучения переводились в значения $\rho_{\text{КР}}$ и $\rho_{\text{БИК}}$ путем калибровки с использованием материалов и поверхностей с известными спектральными характеристиками отражения (речной песок, кварцевый песок, черный бархат, мел). Чувствительность измерений определялась как средняя величина среднеквадратического отклонения (СКО) и в значениях $\rho(\lambda)$ составила 0,001 в канале 630 нм и 0,0012 в канале 800 нм. Средняя величина СКО для индекса NDVI составила 0,01. Датчики объемного содержания влаги обеспечивают измерения в диапазоне от 0% до 100% с точностью не менее $0,03 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и разрешением $0,001 \text{ м}^3/\text{м}^3$ во всех почвах и 0,25% в почвенном субстрате.

Образцы живой растительности отбирались с собственным почвенным субстратом в районе Ямбургского газоконденсатного месторождения (южная тундра, субарктическая зона) в июне 2015 года. Перед размещением образцов нижняя часть контейнеров заполнялась грунтом (глиной, песком), близким по свойствам к естественному минеральному грунту соответствующих типов растительности. Образец № 1, представленный преимущественно мхом «кукушкин лен» (*Polytrichum commune*) с включениями кустарничковой (*Vaccinium vitis-idaea*) и травянистой (*Rubus chamaemorus*, *Luzula wahlenbergii*) растительности, был взят с участка влажных суглинистых отложений. Толщина растительного слоя – 7 см и субстрата – 8 см. Образец № 2 был взят на участке относительно дренированных супесчаных грунтов и представлял собой смешанную низкорослую кустарничково-лишайниково-травянистую растительность (*Empetrum nigrum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Cladonia arbuscula*, *Carex arctisibirica*) с включениями мелких кустарников (*Ledum decumbens*, *Betula nana*). Толщина растительного слоя – 3 см и субстрата – 6 см. Образец № 1 в живом состоянии характеризовался более существенным объемом зеленой массы по сравнению с образцом № 2. В качестве образца № 3 исследовался образец № 1 в неживом состоянии. Дополнительно исследовалась зависимость $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и индекса NDVI от влажности супесчаного грунта (образец № 4), распространенного в арктических и субарктических тундрах.

Размещение контейнеров с образцами и оптическими датчиками над ними обеспечивало их бестеневое солнечное освещение в первой половине дня. Полив образцов проводился в вечернее время с повышением объемного содержания влаги до значений насыщения, после которого вода не удерживалась субстратом. Измерения на образцах № 1 и 2 проводились в период с 30.07 по 30.08.2015 г. В обработку были взяты данные наблюдений 25 малооблачных дней между 10 ч 30 мин и 12 ч 30 мин, регистрация данных осуществлялась с интервалом в 2 мин. Исследование образца № 3 проводилось в период с 02.07 по 02.09.2016 г. на основе данных 43 дней измерений. В период с 16.09 по 27.09.2015 г. проводились аналогичные измерения для супесчаного грунта (образец № 4).

Результаты исследований

На *рис. 2* приведены графики, характеризующие вариации $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и индекса NDVI образца № 1 при изменении объемного содержания влаги (W) от 16% до 51%. Каждая точка соответствует среднему значению параметров, рассчитанному по 60 значениям каждого дня наблюдений. Для $\rho_{\text{КР}}$ отмечается тренд понижения, а для $\rho_{\text{БИК}}$ и NDVI тренд повышения значений при увеличении W , что свидетельствует о повышении содержания хлорофилла в образце и подтверждается заметным увеличением его зеленой массы в конце периода наблюдений. Для образца № 2 влажность в субстрате изменялась от 26% до 46% (*рис. 3*). Здесь при повышении W параметры $\rho_{\text{КР}}$ и $\rho_{\text{БИК}}$ снижаются, а индекс NDVI растет. В данном случае при повышении влажности заметного увеличения объема зеленой массы не наблюдалось, что подтверждается слабым снижением $\rho_{\text{БИК}}$. Рост NDVI здесь, скорее всего, связан с более интенсивным относительным снижением $\rho_{\text{КР}}$ по сравнению со снижением $\rho_{\text{БИК}}$. Для образца № 3 неживой растительности тенденции изменения параметров при изменении W те же, что и для образца № 2 живой низкорослой растительности. При повышении влажности $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ снижаются, а индекс NDVI растет (*рис. 4*). Статистический анализ данных показал, что для образцов №№ 1, 2, 3 коэффициенты корреляции (R) $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и NDVI с влажностью субстрата, а также коэффициенты детерминации (R^2) значимы при доверительной вероятности $p < 0,01$. Повышение влажности образца № 4 (супесь) от 0% до 24% приводит к снижению значений всех трех параметров (*рис. 5*). Из графиков видно, что при $W > 17\%$ повышение влажности не приводит к изменению $\rho_{\text{КР}}$ и $\rho_{\text{БИК}}$.

В соответствии с уравнениями регрессии (*рис. 2, 3, 4, 5*) были рассчитаны значения чувствительности ($\theta_{\text{КР}}$, $\theta_{\text{БИК}}$, θ_{NDVI}) параметров $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и NDVI к изменению объемного содержания влаги субстратов и грунта (*табл. 1*). Значения даны с учетом динамического диапазона изменения параметров, а знак характеризует направленность их изменения в зависимости от изменений W . В *табл. 1* также приведены значения коэффициентов корреляции ($R_{\text{КР}}$, $R_{\text{БИК}}$, R_{NDVI}) параметров $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и NDVI с W субстратов и грунта. Для образца № 4 значения θ и R рассчитаны в диапазоне значений W от 0% до 17%. Характер и направленность изменения $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и NDVI для образца № 1 соответствуют изменению этих параметров для живой растительности с относительно высоким содержанием хлорофилла, в том числе для распространенного в тундре сфагнового мха (*рис. 1а*). Для образца № 2 вариации $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и NDVI не связаны преимущественно с изменением объема зеленой массы. Учитывая незначительную толщину растительности образца № 2, снижение значений $\rho_{\text{БИК}}$ при повышении W может быть связано с влиянием отражения от самого субстрата. Для анализируемых видов живой растительности индекс NDVI характеризуется большими значениями θ_{NDVI} , R_{NDVI} и одинаковой направленностью, что свидетельствует об относительно высокой его информативности как индикатора влажности субстрата этих видов НП.

При изменении W образца № 3 (неживой мох) вариации значений $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и NDVI так же, как и для образца № 2, не связаны с изменением объема зеленой массы и, скорее всего, обусловлены степенью пропитки влагой сухой дернины мха. Для образца № 3

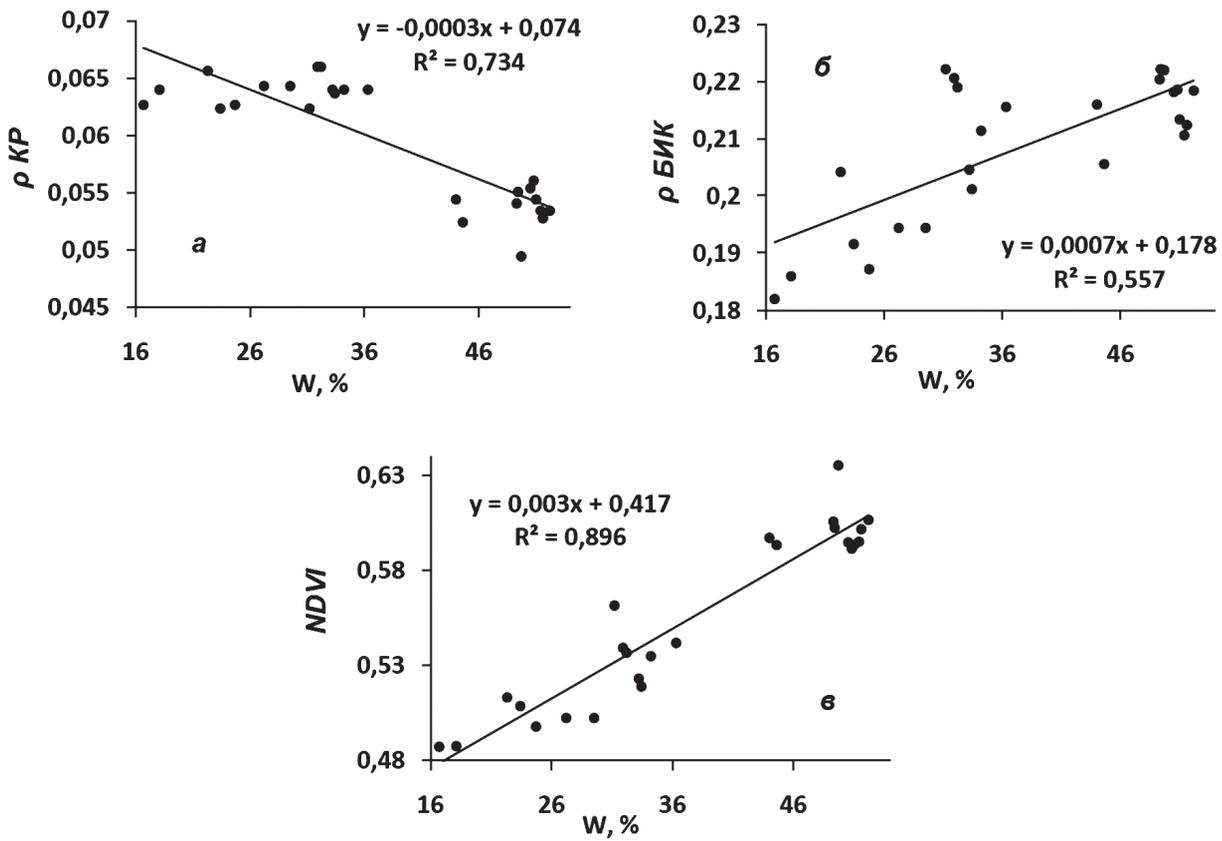


Рис. 2. Зависимость $\rho_{\text{КР}}$ (а), $\rho_{\text{БИК}}$ (б) и индекса NDVI (в) образца № 1 от W

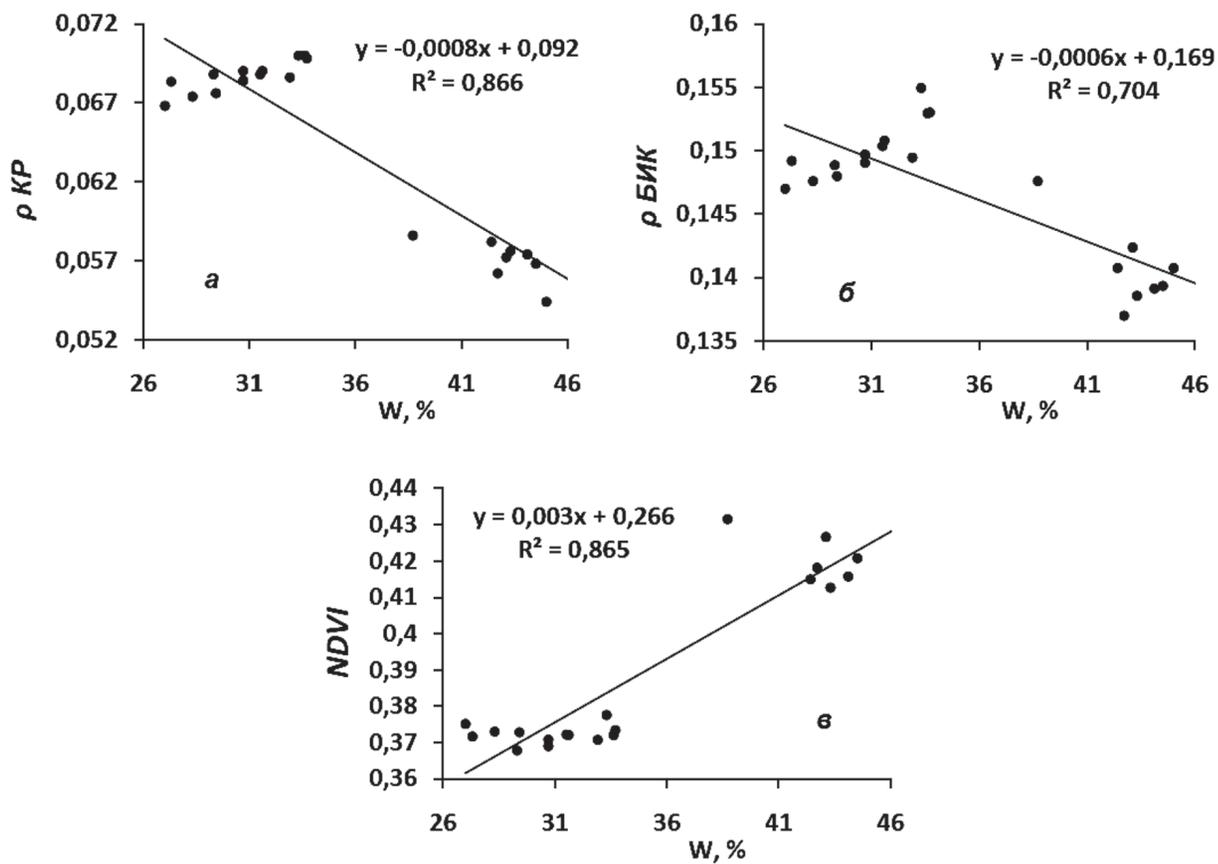


Рис. 3. Зависимость $\rho_{\text{КР}}$ (а), $\rho_{\text{БИК}}$ (б) и индекса NDVI (в) образца № 2 от W

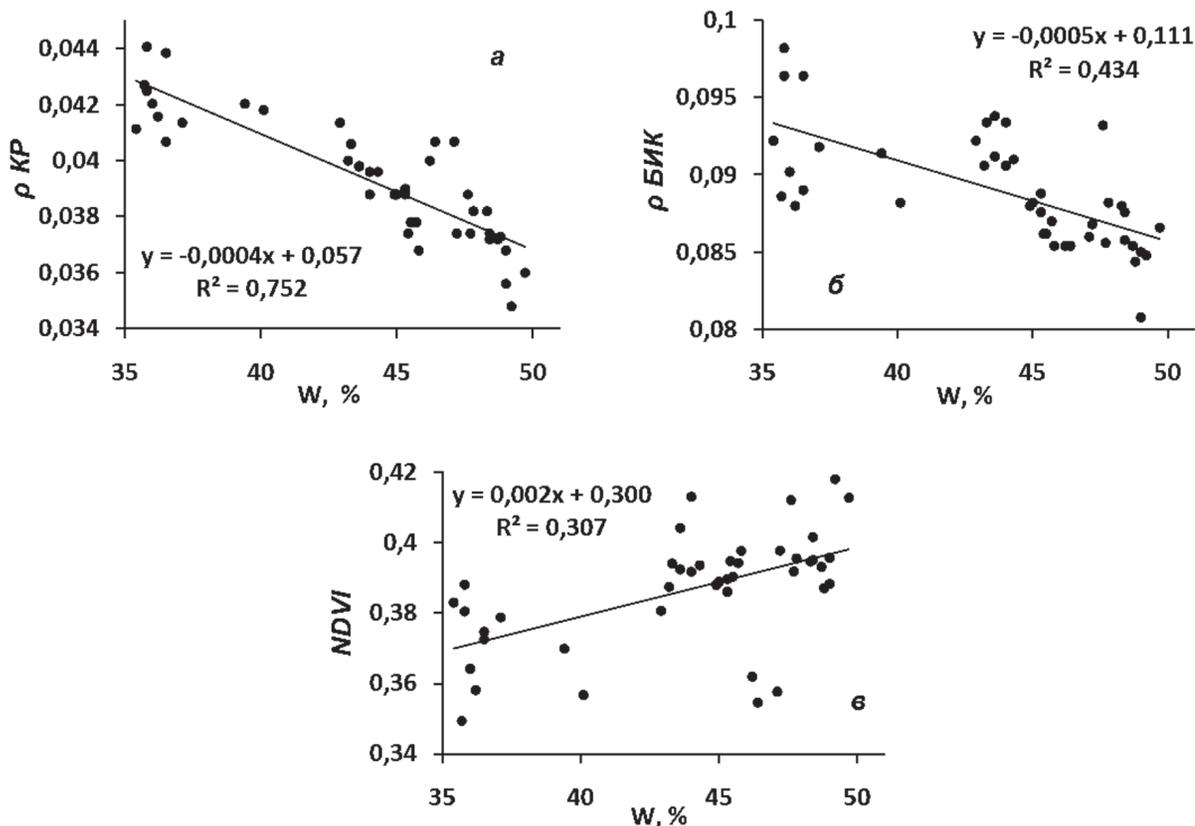


Рис. 4. Зависимость $\rho_{\text{КР}}$ (а), $\rho_{\text{БИК}}$ (б) и индекса NDVI (в) образца № 3 от W

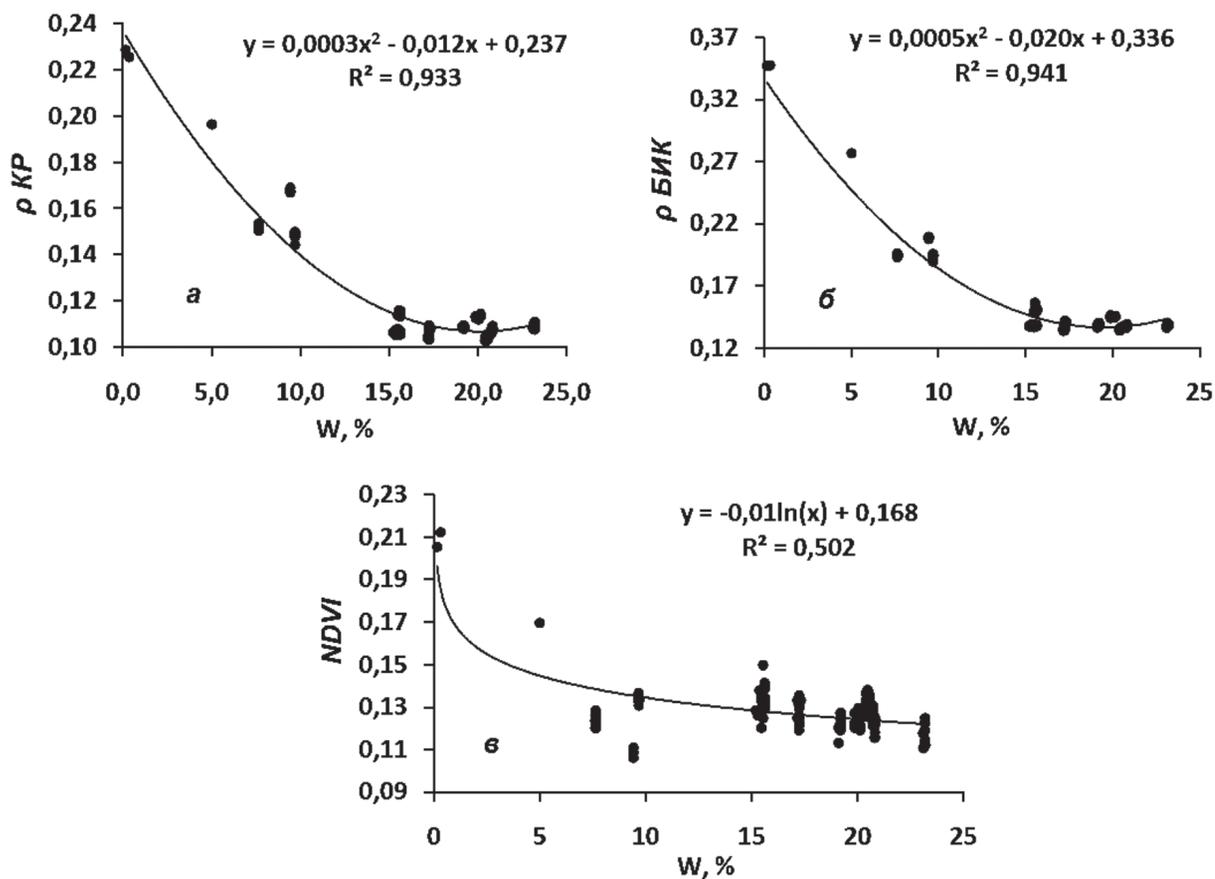


Рис. 5. Зависимость $\rho_{\text{КР}}$ (а), $\rho_{\text{БИК}}$ (б) и индекса NDVI (в) образца № 4 от W

коэффициент корреляции R_{KP} достаточно высок и близок к значениям этого параметра образца № 1 этой же растительности в живом состоянии, в то время как $R_{БИК}$, R_{NDVI} существенно ниже. При одинаковой влажности субстрата значения индекса NDVI для образца № 3 неживого мха в среднем на 32–35% ниже, чем для этого же образца в живом состоянии. Для характеристики изменений влажности субстратов НП, аналогичных образцу № 3, наиболее информативной может быть красная область спектра.

Таблица 1. Значения чувствительности (θ_{KP} , $\theta_{БИК}$, θ_{NDVI}) и коэффициенты корреляции (R_{KP} , $R_{БИК}$, R_{NDVI}) параметров ρ_{KP} , $\rho_{БИК}$ и NDVI с W

Образец	θ_{KP} , $\times 10^{-3}$ (1%)	R_{KP}	$\theta_{БИК}$, $\times 10^{-3}$ (1%)	$R_{БИК}$	θ_{NDVI} , $\times 10^{-3}$ (1%)	R_{NDVI}
№ 1	-0,41	0,856	0,79	0,746	3,66	0,946
№ 2	-0,78	0,930	-0,64	0,839	3,60	0,930
№ 3	-0,40	0,867	-0,46	0,658	2,00	0,554
№ 4	-6,97	0,959	-11,62	0,924	-4,65	0,347

Так же, как и для других типов открытого грунта, описанных в литературе, для оценки изменения влажности супесчаного грунта (образец № 4) наиболее информативным может быть параметр $\rho_{БИК}$, характеризующийся высокими значениями θ и R . Для всех образцов параметр ρ_{KP} в среднем менее чувствителен к изменениям W по сравнению с $\rho_{БИК}$ и NDVI, однако он характеризуется относительно высокими значениями R_{KP} и, что важно, имеет однонаправленный тренд зависимости от влажности. В рамках решаемых задач эта особенность может быть использована для повышения достоверности обнаружения по КСВР изменений влажности субстрата и грунта для участков (в т. ч. смешанных пикселей) с аналогичными видами живой и неживой растительности, открытых субстратов и грунтов, а также их любых композиций.

Заключение

Предварительные результаты лабораторных исследований в целом свидетельствуют о наличии связи ρ_{KP} , $\rho_{БИК}$ и индекса NDVI живой и неживой мохово-травяной, низкорослой смешанной растительности и открытых супесчаных грунтов с влажностью субстратов и грунта, что может быть использовано при разработке методики оценки изменений их влажности в арктических и субарктических тундрах на основе КСВР. Современные КСВР имеют радиометрическое разрешение 11 бит/пиксель, что соответствует величине изменения спектрального коэффициента отражения $\sim 0,5 \times 10^{-3}$. Исходя из значений чувствительности (табл. 1), следует, что теоретически по КСВР могут быть выявлены изменения влажности субстратов с подобной растительностью на уровне 1% и 0,1% для открытого супесчаного грунта. Проведенный эксперимент показывает, что для некоторых видов тундровой растительности рост индекса NDVI не всегда может быть связан с увеличением объема зеле-

ной массы и содержанием хлорофилла. Отсюда следует, что достоверность обнаружения изменений влажности субстратов НП, а также изменений объемов зеленой массы растительности с использованием КСВР может быть повышена при комплексной интерпретации изменений параметров $\rho_{\text{КР}}$, $\rho_{\text{БИК}}$ и NDVI. Очевидно, что разработка и развитие методов для характеристики изменений влажности талых субстратов по КСВР предполагает проведение аналогичных лабораторных и полевых исследований, охватывающих наиболее распространенные типы НП арктических и субарктических тундр.

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

1. *Елсаков В.В., Поликарпова Н.В.* Спутниковые методы в анализе изменений запаса лишайников в фитоценозах заповедника «Пасвик» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 87–97.
2. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 271 с.
3. *Пендин В.В., Ганова С.Д.* Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне. М.: ОАО «ПНИИИС», 2009. 236 с.
4. *Bowers S.A., Hanks R.J.* Reflection of Radiant Energy from Soil // Soil Science. 1965. Vol. 100. P. 130–138.
5. *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.
6. *Hoffer R.M., Johannsen C.J.* Ecological potential in spectral signature analysis // Remote Sensing in Ecology. P.L. Johnson (ed.). University Georgia Press Athens, 1969. 244 p.
7. *Huemrich K.F., Gamon J.A., Tweedie C.E., Oberbauer S.F., Kinoshita G., Houston S., Kuchy A., Hollister R.D., Kwon H., Mano M., Harazono Y., Webber P.J., Oechel W.C.* Remote sensing of tundra gross ecosystem productivity and light use efficiency under varying temperature and moisture conditions // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. P. 481–489.
8. *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.
9. *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 Environment. 2015. Vol. 164. P. 66–76.

Variations of red and near-infrared reflectance and NDVI of tundra vegetation as a function of substrate moisture

S.G. Kornienko

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

Variations in red and near infrared (IR) reflectance and index NDVI of tundra vegetation in response to changes in the volume content of moisture in the substrate and soil have been studied in laboratory on vegetation and substrate samples. Wetter substrate of living moss produces higher near-IR reflectance and NDVI but lower reflectance in the red band. Reflectance in both spectral bands decreases, while NDVI increases, as the moisture content increases in the substrate of shrub-lichen-grass and dead moss. The reflectance in both spectral bands and NDVI are lower in the case of wetter silt soil. These results indicate that NDVI variations in tundra vegetation are not always direct

response to change in the chlorophyll content and green mass abundance. The estimates of substrate moisture variations based on satellite imagery of very high resolution can be more accurate in the case of joint interpretation of NDVI and red and near-IR reflectance patterns.

Keywords: reflectance, substrate moisture, NDVI, tundra vegetation, silt soil

Accepted: 07.02.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-225-234

References

1. Elsakov V.V., Polikarpova N.V., Sputnikovye metody v analize izmenenii zapasa lishainikov v fitotsenozakh zapovednika "Pasvik" (Satellite-based methods in the analysis of inventory changes in lichen communities of the nature reserve "Pasvik"), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015, Vol. 12, No.3, pp. 87–97.
2. Krinov E.L., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnykh obrazovaniy* (The spectral reflectivity of natural formations), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1947, 271 p.
3. 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 "PNIIS", 2009, 236 p.
4. Bowers S.A., Hanks R.J., Reflection of Radiant Energy from Soil, *Soil Science*, 1965, Vol. 100, pp. 130–138.
5. 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, pp. 330–338.
6. Hoffer R.M., Johannsen, C.J., *Ecological potential in spectral signature analysis In Remote Sensing in Ecology*, P.L. Johnson (ed.), University Georgia Press Athens, 1969, 244 p.
7. Huemmrich K.F., Gamon J.A., Tweedie C.E., Oberbauer S.F., Kinoshita G., Houston S., Kuchy A., Hollister R.D., Kwon H., Mano M., Harazono Y., Webber P.J., Oechel W.C., Remote sensing of tundra gross ecosystem productivity and light use efficiency under varying temperature and moisture conditions, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, pp. 481–489.
8. 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. 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 Environment*, 2015, Vol. 164, pp. 66–76.