Оценка информативности температурно-вегетационного индекса как индикатора влажности напочвенного растительного покрова тундровой зоны

С. Г. Корниенко¹, В. В. Елсаков²

¹ Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, 119333, Россия E-mail: spaceakm2@ogri.ru ² Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, 167610, Россия E-mail: elsakov@ib.komisc.ru

Актуальность разработки методов изучения влажности напочвенного растительного покрова (НРП) тундровой зоны Арктики и Субарктики обусловлена необходимостью оценки состояния криогенных ландшафтов в условиях антропогенного воздействия и наблюдаемого тренда потепления климата. Цель работы — оценка информативности температурно-вегетационного индекса WI (англ. Wet Index) как индикатора влажности различных типов НРП тундровой зоны п-ва Ямал. Исследование проводили на участке южных тундр с использованием разномасштабных карт растительности, геоморфологической карты, а также рассчитанного по данным со спутников Landsat за 1988, 1989, 2013 и 2020 гг. съёмки распределения индекса WI. Расчёт индекса выполняли методом «трапеции» на основе диаграмм, характеризующих связь температуры поверхности LST (англ. Land Surface Temperature) и вегетационного индекса NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index). Результаты сопоставления распределения индекса WI с крупномасштабной (М 1:10 000) ландшафтной картой тестового участка показали устойчивую связь между степенью дренирования поверхности различных типов урочищ и изменением средних значений индекса WI. Для фитоценозов и участков открытых песков отмечено заметное снижение индекса WI при повышении геоморфологического уровня от лайды до IV равнины, что свидетельствует об информативности индекса WI как индикатора влажности НРП. Восемь классов фитоценозов, представленных на среднемасштабной карте растительного покрова (М 1:100 000), по индексу WI разделяются на семь-восемь ступеней практически на всех геоморфологических уровнях, включая пойму, I–II террасы, III террасы и IV равнину. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой информативности индекса WI для изучения, картографирования и систематизации различных типов фитоценозов тундровых зон по влажности как основному параметру, характеризующему их теплофизические и теплоизоляционные свойства.

Ключевые слова: влажность, геоморфологические уровни, фитоценозы, систематизация, спутники Landsat, температурно-вегетационный индекс, тундра

Одобрена к печати: 15.05.2024 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-155-170

Введение

Потепление климата и антропогенное воздействие на ландшафты в районах арктических и субарктических тундр относятся к основным причинам изменения свойств напочвенного растительного покрова (НРП), трансформации многолетнемёрзлых пород (ММП) и активизации экзогенных геокриологических процессов, представляющих опасность для промышленных и инфраструктурных объектов. Теплофизические и теплоизоляционные свойства НРП, играющие ключевую роль в процессе теплообмена мёрзлых грунтов с атмосферой, в основном зависят от содержания в них влаги (Soudzilovskaia et al., 2013). Снижение влажности верхней части сезонно-талого слоя (СТС) и НРП в большинстве случаев приводит к увеличению глубины протаивания (Васильев и др., 2023), деградации ММП и, как следствие, к росту объёма эмиссии биогенных парниковых газов. Исключение составляют сильнообводнённые участки, характеризующиеся высоким содержанием влаги в почвах и НРП, на которых отмечается большая глубина СТС и большая амплитуда сезонных процессов просадки и пучения

поверхности (Elsakov et al., 2021). В этой связи приобретают актуальность исследования, касающиеся построения обновляемых картографических моделей, характеризующих изменения влажности НРП в течение вегетационного сезона и между отдельными годами.

В тундровой зоне НРП, как правило, сильно неоднороден, мозаичен и в ранге урочищ и морфологических единиц более высокого ранга представляет собой фитоценозы, составленные сочетаниями лишайников и растений разных жизненных форм. Каждый однородный по составу геоботанический выдел характеризуется индивидуальными показателями накопления, удержания и испарения влаги (транспирации). Учитывая многообразие факторов, от которых может зависеть влажность НРП и охват исследуемых территорий, реализация задач картографирования, мониторинга и систематизации НРП по влажности с приемлемой детальностью может быть осуществлена только на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Существующие картографические модели, характеризующие влажность НРП тундровых зон (для п-ва Ямал: https://gis.krasn.ru/maps/app/view.php?id=2d37774c-c175-d63c-68abb80a7050400f), основанные на данных микроволновых радиометров MIRAS (*англ.* Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) спутника SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity), а также AMSR-2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer-2) спутника GCOM-W1 (*англ.* Global Change Observation Mission – Water 1), имеют очень низкое пространственное разрешение (порядка 40 км), что практически исключает возможность их использования при решении задач регионального и локального масштаба. Снимки спутников серии Landsat с пространственным разрешением тепловых каналов 60–120 м позволяют проводить подобный анализ, в том числе с привлечением крупномасштабных ландшафтных и геоботанических карт, полученных на тестовые участки (Корниенко, 2020).

Известны работы, подтверждающие высокую информативность рассчитываемого по данным космической съёмки индекса TVDI (*англ.* Temperature-Vegetation Dryness Index) как индикатора засухи поверхности в районах полуаридного климата (Carlson, 2007; Garcia et al., 2014). В подобных исследованиях широко применяются так называемые методы «треугольника» или «трапеции», основанные на зависимости температуры поверхности от влажности различных типов НРП. Физическая суть этих методов состоит в том, что для конкретного образца почвы или растительности изменение его влажности приводит к изменению теплоёмкости, интенсивности испарения и, соответственно, к изменению температуры поверхности (Langer et al., 2011). Эти методы нечувствительны к вариациям температуры и влажности воздуха, но могут обеспечить точность, сравнимую с другими методами (Carlson, 2007). Различия спектральных характеристик являются основанием для разделения неоднородных ландшафтов и типов поверхности (почв, растительного покрова), в том числе по вегетационным индексам или по альбедо (Garcia et al., 2014; Nutini et al., 2014).

Цель настоящей работы — оценить информативность температурно-вегетационного индекса для характеристики, картографирования и систематизации различных типов НРП тундровой зоны по влажности на примере территории крупного района центральной части п-ва Ямал с использованием данных со спутников Landsat.

Характеристика района исследований

Анализируемый район исследований размером 74×41 км расположен в юго-западной части п-ва Ямал на границе подзон северных и южных субарктических тундр в бассейне рек Нябыяха и Муртыяха (*puc. 1*, см. с. 157). Выбор района обусловлен относительной стабильностью состояния ландшафтов и растительного покрова, поскольку за исключением участка трассы магистрального газопровода (МГ) «Бованенково – Байдарацкая Губа» здесь отсутствуют площадки промышленных объектов и явные признаки антропогенного воздействия. Изменение состояния поверхности, связанное со строительством газопровода в 2008– 2013 гг., не фиксируется в коридоре трассы МГ на расстоянии более 100 м от центральных осей обоих его ниток (Корниенко, 2022). Район характеризуется сплошным распространением ММП и залегающими близко к поверхности пластовыми льдами. Район относится к равнинным территориям с относительно плоским рельефом, густой сетью рек, большим количеством болот и озёр преимущественно термокарстового происхождения. Растительный покров сильно неоднороден, практически полностью покрывает земную поверхность и представляет собой фитоценозы, включающие комбинации растений разных жизненных форм (кустарники, мхи, лишайники, травы и др.) высотой от 0,5 до 50 см (Андреяшкина, 2009; Морозова, Магомедова, 2004). Глубина максимальной протайки СТС в схожих условиях в районе полярной станции Марресаля (см. *рис. 1а*) не превышает 1,5 м (Васильев и др., 2023).



Рис. 1. Схема расположения района исследований (*a*) и карта геоморфологических уровней (*б*) в его границах: 1 — водные поверхности; 2 — отмель (пляж); 3 — лайда; 4 — пойма; 5 — I–II террасы; 6 — III терраса; 7 — IV равнина; 8 — тестовый участок (ТУ)

Геоморфологическая карта (см. *рис. 16*) характеризует гипсометрические уровни района исследований существующих или существовавших ранее выровненных поверхностей, которые формировались в условиях длительной тектонической стабилизации. На карте обозначено положение одного из тестовых участков размером 5×4 км, входящего в число пяти аналогичных участков, расположенных вдоль трассы МГ «Бованенково – Байдарацкая губа» (Корниенко и др., 2013). На этих участках на основе данных полевых исследований и дешифрирования космических снимков высокого пространственного разрешения сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии и Института проблем нефти и газа РАН в 2009–2013 гг. проводилось детальное изучение и картографирование ландшафтов, типов растительности и геокриологических условий с характеристикой степени дренирования поверхности.

Исходные данные и методика исследований

Оценка информативности параметров, рассчитанных по данным ДЗЗ, может быть установлена сопоставлением с материалами альтернативных методов, с определённой степенью достоверности характеризующих пространственную неоднородность изучаемых свойств поверхности. Что касается влажности НРП тундровых зон, то к настоящему времени практически отсутствуют приемлемые карты распределения этого параметра для ненарушенных ландшафтов, что связано, в первую очередь, со сложностью проведения масштабных полевых измерений и существенной неоднородностью поверхности. В данной работе в качестве контрольных (обучающих) объектов используются особенности ландшафта с известными признаками степени дренирования поверхности. Неоднородности мезо- и микрорельефа в тундрах оказывают существенное влияние на содержание влаги в почвенно-растительном покрове, причём на более высоких геоморфологических уровнях влажность поверхности ниже, что объясняется её дренированием и переносом в нижерасположенные элементарные ландшафты. В работе также использованы ландшафтная и геоботаническая карты с обозначением типичных фитоценозов, степень дренирования которых установлена на основе опыта многолетних полевых исследований (Андреяшкина, 2009).



Рис. 2. Крупномасштабная (М 1:10 000) карта типов урочищ и характерной растительности тестового участка. Цифрами обозначены: 1 — долины ручьёв с разнотравно-злаковыми ивняками, фрагментами болот и торфяников; 2 — дренированные поверхности с песчаными раздувами, лишёнными растительности; 3 — дренированные поверхности с полигональными кустарничково-моховыми-лишайниковыми тундрами, с мелкими песчаными раздувами; 4 — дренированные пятнисто-медальонные бугорковатые поверхности; 5 — слабодренированные поверхности с травяно-моховыми ивняками; 6 — плоские и наклонные поверхности, слабодренированные с полигональными кустарничково-лишайниково-моховыми тундрами; 7 — слабонаклонные поверхности и пологие склоны с пятнамимедальонами, солифлюкционными террасками, с заболоченными мочажинами с травяно-ерниково-моховыми тундрами; 8 — склоны с термоцирками и сплывинами, с уступами и гребнеобразными останцами, озерками, травяно-кустарниковыми тундрами; 9 — подножия склонов с высокими травяно-моховыми ивняками, с фрагментами луговой растительности и редкими мочажинами; 10 — ложбины, полосы стока, лога и овраги с травяными болотами по днищам и травяно-моховыми ивняками по склонам; 11 — днища хасыреев, межхолмовых понижений с кустарничково-моховыми болотами, с фрагментами кочковатых тундр и полигональных торфяников; 12 — плоские поверхности и понижения с полигональными травяно-кустарничково-мохово-лишайниковыми торфяниками

Геоморфологическая карта (см. *рис. 16*) построена на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDem (https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem) с пространственным разрешением 30 м. В соответствии с ЦМР перепад высот для данного района составляет от 0 до 70 м. Согласно методике зонирования ландшафта в районе п-ва Ямал (Крицук, Дубровин, 2003) и исходя из ЦМР, к лайде отнесены участки с перепадом высот 0–3 м, к пойме — 3–8 м, к I–II террасам — 8–27 м, к III террасе — 27–40 м, к IV равнине — 40–70 м.

В условных обозначениях используемой в работе детальной ландшафтной (М 1:10 000) карты тестового участка (*рис. 2*, см. с. 158) (Корниенко, 2020) типы урочищ и характерной растительности размещены в порядке понижения форм рельефа и роста увлажнения. Исключение составляют долины ручьёв (1), относимые к пойменному типу урочищ. К наиболее сухим (дренированным поверхностям) относятся участки песчаных раздувов на водоразделах (2) и полигональных кустарничково-мохово-лишайниковых тундр (3), к наиболее влажным — участки заболоченных хасыреев и болота (11).

Особенности распределения растительного покрова во всём районе исследований рассматривались на основании среднемасштабной (М 1:100 000) карты, созданной сотрудниками Института биологии Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения РАН» на территорию п-ва Ямал в рамках научно-исследовательской работы «Геоботаническая оценка оленьих пастбищ Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Хозяйственная оценка оленьих пастбищ лесотундры и подзоны южных тундр Ямальского района ЯНАО (полуостров Ямал, 2016 г.)».

Для построения геоботанической карты использовали набор снимков спутника Landsat (17 сцен Landsat-5 и Landsat-8 OLI) съёмки 2009—2013 гг. При построении карты растительного покрова и типов земной поверхности использовали каналы видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов длин волн. После подбора приемлемых сцен, отнесённых к схожему состоянию растительности, атмосферной и радиометрической коррекции, по методу решающих правил формировалась мозаика изображений с последующим разбиением на 10 классов, включающих восемь типов фитоценозов, участки песков и водных поверхностей (*puc. 3*).



Рис. 3. Растительный покров района исследований (М 1:100 000), обработка серии снимков Landsat. Цифрами обозначены: 1 — кустарничково-лишайниковая тундра; 2 — мохово-лишайниковая тундра; 3 — моховая тундра; 4 — кустарниково-моховая тундра; 5 — ивняки; 6 — болота сфагновые; 7 — грядово-мочажинные болотные комплексы; 8 — луговины; 9 — пески; 10 — водные поверхности; 11 — тестовый участок

Известно, что в тундровой зоне распределение фитоценозов определяется положением в рельефе (Морозова, Магомедова, 2004), в то же время сравнение карты растительного покрова на исследуемый район (см. *рис. 3*) с геоморфологической картой (см. *рис. 16*) показывает, что большинство фитоценозов расположены в пределах различных геоморфологических уровней.

Для расчёта индексов в работе использовались мультиспектральные снимки спутника Landsat (*таблица*) уровня обработки L1 с пространственным разрешением 30 м в видимой и ближней ИК-области спектра и 100 м (Landsat-8 OLI) и 120 м (Landsat-4, -5 TM (*англ.* Thematic Mapper)) в тепловой (дальней ИК) области. Условиями выбора снимков были полное отсутствие облачности и отсутствие осадков как минимум за три дня до съёмки. Даты съёмки выбирали в интервале после полного схода паводковых вод, а также в период максимума вегетации. Подбор нескольких снимков разных лет позволяет минимизировать влияние случайных факторов и сезонных изменений. Этап предварительной обработки снимков Landsat включал калибровку спектральных каналов.

Дата съёмки	Спутник	Местное время съёмки	Кадр (Path; Row)
31.07.1988	Landsat-4	11:40	166; 11
11.08.1989	Landsat-5	11:37	
19.07.2013	Landsat-8	12:19	167; 11
22.07.2020		12:17	

Используемые в работе снимки со спутников Landsat

По данным космической съёмки для каждого года рассчитывался вегетационный индекс NDVI (*англ*. Normalized Difference Vegetation Index) (Tucker, 1979), характеризующий запас зелёной массы в НРП, индекс NDWI (*англ*. Normalized Difference Water Index) (Gao, 1996), характеризующий содержание влаги на поверхности покрова, индекс водной поверхности MNDWI (*англ*. Modified Normalized Difference Water Index) (Xu, 2006) для создания маски водоёмов. Также рассчитывались значения температуры поверхности LST (*англ*. Land Surface Temperature) (Weng et al., 2004) и температурно-вегетационного индекса WI (*англ*. Wet Index) как индикатора влажности НРП.



Рис. 4. Диаграмма зависимости LST от NDVI в районе исследований по данным съёмки со спутника Landsat-8 за 22.07.2020

Для характеристики влажности НРП районов полярного гумидного климата рекомендован индекс влажности WI как обратный индексу засухи TVDI (Garcia et al., 2014), который рассчитывали по формуле:

WI = 1 - TVDI =
$$\frac{LST_{dry} - LST_s}{LST_{dry} - LST_{wet}}$$
,

где LST_s — температура поверхности в наблюдаемом пикселе; LST_{wet} и LST_{dry} — соответственно минимально и максимально возможные значения температуры поверхности для пикселей с такими же значениями вегетационного индекса или альбедо, как и для наблюдаемого пикселя. Для максимально сухих поверхностей WI = 0, а для максимально влажных WI = 1.

В настоящей работе расчёт индекса WI проводили с использованием NDVI-LST-метода (Garcia et al., 2014). Этот подход позволяет вычислить WI для каждого пикселя как относительное расстояние от двух пороговых линий, называемых «сухим» и «влажным» краем, определяемое через отношение NDVI-LST для конкретной даты съёмки со спутника. На *рис. 4* (см. с. 160) в качестве примера приведена диаграмма рассеяния значений LST в зависимости от NDVI по данным съёмки 22.07.2020 на весь район исследований (см. *рис. 16*). На графике приведены уравнения линейной регрессии, характеризующие температуру поверхности сухого (красный цвет) и влажного (синий цвет) края общей диаграммы.

Расчёт значений WI для каждого *i*-го пиксела проводился по формуле:

WI_i =
$$\frac{(a_{dry} \text{NDVI}_i + b_{dry}) - \text{LST}_{s_i}}{(a_{dry} \text{NDVI}_i + b_{dry}) - (a_{wet} \text{NDVI}_i + b_{wet})},$$

где $a_{dry,} b_{dry}$, и a_{wet}, b_{wet} — коэффициенты уравнений регрессии, характеризующих значения температуры поверхности для соответственно сухого и влажного края диаграммы рассеяния. По снимкам каждого года проводится расчёт индекса WI и строятся соответствующие изображения (карты), определяющие пространственное распределение этого параметра.

Согласно среднемасштабной карте растительного покрова (см. *рис. 3*), участки без НРП занимают менее 1 % анализируемой территории (исключая водные поверхности). Пиксели, относящиеся к водным поверхностям, исключались из анализа на основе порогового значения индекса MNDWI > 0.

Формирование температуры на поверхности НРП зависит не только от метеорологических условий, но и от процессов теплообмена (кондуктивного, конвективного) между растительным покровом и подстилающими его субстратами (торф, минеральные грунты). Поскольку влажность НРП существенно зависит от влажности субстратов, а их температура с той же направленностью, как и температура растительности, зависит от содержания влаги, индекс WI может выступать в качестве индикатора влажности всего приповерхностного почвенно-растительного слоя.

Характеристика связи индекса WI с особенностями рельефа и типами НРП проводилась на основе средних значений, среднеквадратического отклонения (СКО) распределения индекса WI, а также количества пикселей в границах анализируемых выборок данных. Статистическая достоверность различий средних значений индекса WI анализируемых выборок проводилась с использованием *t*-критерия Стьюдента. Достоверными считались различия, удовлетворяющие 5%-му уровню значимости (p < 0,05). Построение карт распределения значений индекса WI проводилось при 99%-м доверительном интервале.

Результаты исследований и их обсуждение

На *рис. 5* приведены диаграммы, характеризующие связь средних значений анализируемых параметров (NDVI, NDWI, LST, WI) каждого года съёмки с геоморфологическими уровнями района исследований. Несмотря на межгодовые расхождения абсолютных значений параметров, отмечаются схожие тенденции изменения их средних значений от лайды до IV равнины.



На *рис. 5* и далее на всех рисунках с диаграммами вертикальные планки соответствуют диапазону ±СКО распределения параметров.

Рис. 5. Диаграммы распределения средних значений параметров по геоморфологическим уровням района исследований по данным съёмки 31.07.1988, 11.08.1989, 19.07.2013, 22.07.2020: *a* – NDVI; *δ* – NDWI; *в* – LST; *e* – WI (1 – лайда, 2 – пойма, 3 – I–II террасы, 4 – III терраса, 5 – IV равнина)

Индекс NDVI практически не меняется от поймы до IV равнины (см. *рис. 5a*). Наиболее низкие величины NDVI отмечены на участках приморских лайд. Заметная разница между средними значениями NDVI 1988—1989 и 2013—2020 гг. скорее всего связана с различиями характеристик спектральных каналов радиометров TM (Landsat-5) и OLI (Landsat-8) (Елсаков, 2021). Индекс NDWI в 1988 г. снижается от лайды до III террасы, а для всех лет наблюдений практически одинаков в границах III террасы и IV равнины (см. *рис. 5б*). В то же время для 2013 и 2020 гг. съёмки отмечается незначительное повышение индекса NDWI от I–II террас до IV равнины, что указывает на нестабильность этого параметра для характеристики влажности НРП.

Температура поверхности (LST) практически не меняется от I–II террас до IV равнины (см. *рис. 5в*). В то же время для всех лет наблюдается устойчивое снижение средних значений индекса WI от лайды к IV равнине (см. *рис. 5г*), что подтверждает связь параметра с влажностью почвенно-растительного покрова. Представленные на диаграмме (см. *рис. 5г*) средние значения WI статистически разделимы между геоморфологическими уровнями для каждого года съёмки. Аномально высокие значения LST, наблюдаемые в 2013 г. (см. *рис. 5в*), связаны с относительно высокой температурой воздуха на момент съёмки. В то же время распределение индекса WI 2013 г. (см. *рис. 5г*) практически идентично распределению других лет, что может служить подтверждением слабой чувствительности индексов TVDI и WI к вариациям атмосферных и метеорологических условий (Carlson, 2007).

Отдельно для участков песчаных раздувов, отображаемых на карте растительного покрова (см. *рис. 3*), для всех лет наблюдений отмечается приблизительно одинаковое снижение индекса WI от поймы к IV равнине (*рис. 6*, см. с. 163).

Рис. 6. Диаграмма распределения средних значений индекса WI песков на разных геоморфологических уровнях по данным съёмки 31.07.1988, 11.08.1989, 19.07.2013, 22.07.2020. Условные обозначения приведены на *рис.* 5

Поскольку сухой песок на любом из геоморфологических уровней имеет практически одинаковые и однородные физические свойства (альбедо, коэффициент излучения, плотность, состав и т.д.), снижение значе-



ний WI, в частности от поймы к IV равнине, связано только с уменьшением содержания влаги. Средние значения WI для песков в границах геоморфологических уровней также статистически разделимы (p < 0.05) для каждого года съёмки.

Оценка информативности индекса WI как индикатора влажности НРП проводилась также с использованием крупномасштабной ландшафтной карты тестового участка (*puc. 2*). На *puc.* 7 для этого участка приведены фрагменты карт распределения индекса WI разных лет съёмки. Градация шкалы значений дана в цветовой гамме с интервалом в 10 % от общего распределения параметра. Визуальное сравнение свидетельствует о достаточно близком пространственном соответствии распределения WI по всем годам съёмки. Аномально высокие значения индекса WI (синие тона), в основном соответствуют типу урочищ в границах заболоченных хасыреев (см. 11 на *puc. 2*) с минимально дренированной (переувлажнённой) поверхностью (на *puc.* 7 обозначены белыми контурами). Аномально низкие значения WI (красные и розовые тона) в основном попадают в границы урочищ с наиболее дренированной поверхностью — песчаных раздувов (см. 2 на *puc. 2*) и кустарничково-мохово-лишайниковой тундры с мелкими песчаными раздувами (см. 3 на *puc. 2*) (на *puc.* 7 обозначены чёрными контурами).



Рис. 7. Фрагменты карт распределения индекса WI на тестовый участок по данным съёмок: *a* — 31.07.1988; *б* — 11.08.1989; *в* — 19.07.2013; *г* — 22.07.2020. Белыми контурами обозначены границы урочища 11 на *рис.* 2, чёрными контурами обозначены границы урочищ 2 и 3 на *рис.* 2

Статистический анализ позволяет получить более точное представление о связи типов урочищ с распределением индекса WI. На *рис. 8* (см. с. 164) приведена диаграмма, характеризующая связь средних значений индекса WI каждого года съёмки с типами урочищ на тестовом участке. Участки долин ручьёв (см. 1 на *рис. 2*) были исключены из анализа, поскольку неоднозначна степень их дренирования при наличии водной поверхности.



Рис. 9. Карты распределения индекса WI в границах района исследований, построенные по данным съёмки со спутников Landsat: *a* — 31.07.1988; *б* — 11.08.1989; *в* — 19.07.2013; *г* — 22.07.2020. ТУ — тесто-вый участок

На диаграмме (см. *рис. 8*) цифрами 2–12 слева направо, по мере снижения степени дренирования, обозначены типы урочищ согласно условным обозначениям ландшафтной карты тестового участка (см. *рис. 2*). Распределение средних значений WI на диаграмме указывает на общую для всех лет съёмки тенденцию повышения индекса в соответствии с увеличением влажности поверхности. Большинство типов урочищ статистически разделимы по средним значениям индекса WI за каждый год съёмки. Исключение составляют: для 1988 г. пара урочищ 5–3; для 1989 г. пары 6–9, 5–8, 10–5; для 2013 г. 5–7, 10–8; для 2020 г. 11–6, 10–8. Учитывая относительно небольшую площадь тестового участка, для этих урочищ неразделимость значений WI может быть связана с близкими значениями их влажности. Наиболее дренированные поверхности урочищ 2 и 3 характеризуются минимальными средними значениями WI по всем четырём снимкам. Максимально высоким средним значениям WI по всем четырём годам съёмки соответствует наименее дренированная поверхность урочища 11 с болотами и хасыреями. Остальные типы урочищ занимают промежуточное положение в общем ряду средних значений индекса WI. Урочища 2, 3 и 11 статистически разделимы по средним значениям WI для каждого года съёмки, что свидетельствует об информативности индекса WI как индикатора влажности поверхности. На диаграмме (см. *рис. 8*) отмечаются идентичные по годам распределения средних значений WI, что указывает на неслучайный характер связи индекса WI с типами урочищ.

На *рис. 9* (см. с. 164) приведены карты распределения индекса WI, построенные по данным съёмки 1988, 1989, 2013 и 2020 гг. в границах всего района исследований. Все карты достаточно близки по характеру распределения WI, в первую очередь по расположению крупных зон аномально низких и аномально высоких значений.

Характеристика фитоценозов по влажности во всём районе проводилась путём сопоставления карты растительного покрова (см. *рис. 3*) с четырьмя картами распределения индекса WI разных лет (см. *рис. 9*). Учитывая, что распределение WI существенно зависит от геоморфологических уровней (см. *рис. 5г*), разделение фитоценозов по индексу WI проводилось отдельно для каждого уровня. Для приморской лайды оценка не проводилась, поскольку значительную её часть занимает песчаная отмель (пляж) (см. *рис. 3*).

На диаграммах рассеяния уравнения линейной связи между значениями индекса WI 1988–1989 гг. (*рис. 10a*) и 2013–2020 гг. (*рис. 10б*) с достаточно высокими коэффициентами детерминации (R^2) 0,85 и 0,87 также свидетельствуют о неслучайном характере полученных распределений WI в границах всего района исследований.



Рис. 10. Диаграммы рассеяния значений индекса WI по данным съёмки: *a* — 1988–1989 гг.; *б* — 2013–2020 гг.

На *рис. 11* (см. с. 166) приведены диаграммы, характеризующие распределение средних значений индекса WI по типам фитоценозов, представленных на среднемасштабной карте растительного покрова (см. *рис. 3*) в границах различных геоморфологических уровней для каждого года съёмки.

На диаграммах (см. *puc. 11*) цифрами 1–8 обозначены фитоценозы согласно условным обозначениям карты растительного покрова района исследований (см. *puc. 3*). Также как и для тестового участка, на диаграммах *puc. 11* отмечаются идентичные по годам распределения средних значений WI, что указывает на системную связь индекса WI с типами фитоценозов. На всех геоморфологических уровнях аномально низкие значения WI соответствуют кустарничково-лишайниковой тундре (1) и луговинам (8) (см. *puc. 11*). Согласно Н.И. Андреяшкиной (2009) эти типы НРП на водоразделах приурочены к наиболее дренированным (сухим) поверхностям. Аномально высокие средние значения WI на всех геоморфологических уровнях соответствуют ивнякам (5) и болотам сфагновым (6), которые характеризуются наиболее высокой влажностью поверхности (Андреяшкина, 2009). Остальные типы НРП (2, 3, 4, 7) занимают промежуточное положение в общем ряду средних значений индекса WI.

Практически все фитоценозы за каждый год съёмки на каждом геоморфологическом уровне статистически разделимы (p < 0,05) по средним значениям индекса WI. Неразделимыми в границах IV равнины оказались для 1988 г. фитоценозы кустарничково-лишайниковой (1) и мохово-лишайниковой (2) тундры, а для 1989 г. — ивняки (5) и болота сфагновые (6). Таким образом, все восемь типов фитоценозов могут быть разделены по величине средних значений индекса WI и, соответственно, по влажности на семь-восемь ступеней.





Рис. 11. Диаграммы распределения средних значений индекса WI по типам фитоценозов, представленных на среднемасштабной карте растительного покрова по данным съёмки 31.07.1988, 11.08.1989, 19.07.2013, 22.07.2020 в границах: *а* — поймы; *б* — I—II террас; *в* — III террасы; *г* — IV равнины. Расшифровка обозначений соответствует *рис. 3*

Диаграммы на *puc. 5г, 6, 8, 10* и *11* в целом свидетельствуют о принципиальной возможности использования индекса WI для характеристики влажности поверхности тундровых ландшафтов как с растительным покровом, так и на участках его лишённых. Выделы с максимальной контрастностью влажности поверхности (геоморфологические уровни, пески, урочища, фитоценозы) характеризуются максимальной разницей средних значений WI. Следует отметить, что, несмотря на достаточно высокий уровень СКО, средние значения индекса WI анализируемых выделов в основном статистически разделимы, что обусловлено, в том числе, достаточно большим количеством значений (пикселей) в их границах.

В связи с отсутствием в районе исследований активной промышленной и хозяйственной деятельности межгодовые вариации влажности НРП и индекса WI для крупных зон обусловлены преимущественно природными процессами, в первую очередь, неравномерным выпадением осадков. Наблюдаемые различия в распределении WI (см. *рис. 9*) также могут быть связаны с сезонными фенологическими изменениями и с локальными трансформациями ландшафта.

Заключение

Результаты исследований на п-ве Ямал в целом свидетельствуют о достаточно высокой информативности температурно-вегетационного индекса WI, рассчитанного по данным со спутников Landsat для характеристики и картографирования влажности напочвенных растительных покровов тундровой зоны. При систематизации различных фитоценозов по влажности с использованием среднемасштабной карты растительного покрова (М 1:100 000) восемь типов напочвенного растительного покрова разделяются по средним значениям индекса WI на семь-восемь ступеней, причём на всех геоморфологических уровнях (кроме приморской лайды). Таким образом, по средним значениям индекса WI практически каждый тип фитоценоза может быть охарактеризован по уровню влажности, отличающемуся от остальных.

Индекс WI может быть использован при решении задач эколого-промышленного мониторинга для выявления локальных изменений влажности почвенно-растительного покрова тундровой зоны, в том числе связанных с антропогенными трансформациями ландшафта. Обоснование возможности использования индекса WI в качестве индикатора влажности напочвенного покрова может рассматриваться как этап решения более сложной задачи — динамического картографического моделирования теплозащитных свойств НРП в условиях их естественного распространения и возможных трансформаций. Предлагаемый подход создания обновляемых карт распределения индекса WI может внести существенный вклад в изучение криогенных ландшафтов, в том числе для характеристики неоднородности мёрзлых грунтов и контроля их состояния в условиях изменения климата и антропогенного воздействия. Карты распределения индекса WI также могут быть использованы для характеристики влагообеспеченности территорий при прогнозировании степени пожарной опасности тундровых зон.

Работа выполнена в рамках государственных заданий по темам «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата» (№ 122022800264-9) и «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского северо-востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов» (№ 122040600023-8).

Литература

- 1. *Андреяшкина Н. И.* Оценка современного состояния растительного покрова на водоразделах полуострова Ямал // Вестн. ОГУ. 2009. № 12(106). С. 16–23.
- 2. *Васильев А.А., Облогов Г.Е., Широков Р.С.* Долговременный мониторинг глубины сезонного протаивания пород в типичных тундрах западного Ямала // Криосфера Земли. 2023. Т. 27. № 4. С. 3–13. DOI: 10.15372/KZ20230401.
- 3. *Елсаков В. В.* Спектральные различия характеристик растительного покрова тундровых сообществ сенсоров Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 92–101. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-92-101.
- Корниенко С. Г. Использование тепловых снимков со спутника Landsat-7 при картографировании тундровых ландшафтов на примере участка газопровода «Бованенково – Байдарацкая Губа» // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 3(30). С. 51–63. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-30.art6.
- Корниенко С. Г. Опыт использования снимков со спутников Landsat для характеристики трансформаций напочвенного покрова на участке «Бованенково – Байдарацкая Губа» трассы магистрального газопровода «Бованенково – Ухта» // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. Вып. 4(39). С. 126–147. DOI.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-39.art10.
- 6. Корниенко С. Г., Якубсон К. И., Дубровин В. А., Крицук Л. Н., Ястреба Н. В. Аэрокосмический геокриологический мониторинг трассы газопровода «Бованенково – Байдарацкая губа» // Газовая пром-сть. 2013. № 7. С. 24–27.
- 7. *Крицук Л. Н., Дубровин В.А.* Карты геокриологического районирования как основа геоэкологической оценки осваиваемой территории криолитозоны // Разведка и охрана недр. 2003. № 7. С. 12–15.

- 8. *Морозова Л. М., Магомедова М. А.* Структура растительного покрова и растительные ресурсы полуострова Ямал. Екатеринбург. Изд-во Уральского ун-та, 2004. 63 с.
- 9. *Carlson T.* An Overview of the "Triangle Method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery // Sensors. 2007. V. 7. P. 1612–1629. https://doi.org/10.3390/s7081612.
- 10. *Elsakov V.V., Kaverin D.A., Shchanov V.M.* The study of seasonal vertical changes of ground surface in the Polar Ural foothills based on field measurements and alos palsar radar interferometry // Earth's Cryosphere. 2021. V. 25. No. 5. P. 36–46. DOI: 10.15372/KZ20210505.
- 11. *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. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- 12. *Garcia M., Fernández N., Villagarcía L. et al.* Accuracy of the Temperature–Vegetation Dryness Index using MODIS under water-limited vs. energy-limited evapotranspiration conditions // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 149. P. 100–117. DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.002.
- 13. *Langer M., Westermann S., Muster S. et al.* The surface energy balance of a polygonal tundra site in northern Siberia Part 1: Spring to fall // The Cryosphere. 2011. No. 5. P. 151–171. DOI: 10.5194/tc-5-151-2011.
- 14. *Nutini F., Boschetti M., Candiani G. et al.* Evaporative fraction as an indicator of moisture condition and water stress status in semi-arid rangeland ecosystems // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 6300–6323. DOI:10.3390/rs6076300.
- 15. Soudzilovskaia N.A., Van Bodegom P.M., Cornelissen J. H. C. Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation // Functional Ecology. 2013. No. 27. P. 1442–1454. DOI: 10.1111/1365-2435.12127.
- 16. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. V. 8. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- 17. *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. DOI:10.1016/j. rse.2003.11.005.
- Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2006. V. 27. No. 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.

Assessment of informativeness of temperature-vegetation index as an indicator of moisture content of tundra ground vegetation cover

S.G. Kornienko¹, V.V. Elsakov²

 ¹ Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow 119333, Russia E-mail: spaceakm2@ogri.ru
² Institute of Biology of Komi Science Centre UrB RAS, Syktyvkar 167610, Russia E-mail: Elsakov@ib.komisc.ru

The relevance of developing methods for studying the moisture content of ground vegetation cover (GVC) in tundra zones of the Arctic and Subarctic is due to the need to assess the state of cryogenic landscapes under anthropogenic impact and the observed trend of climate warming. This work aims to assess the informativeness of the temperature-vegetation index WI (Wet Index) as an indicator of humidity of different types of GVCs in the tundra zone of the Yamal Peninsula. The study was conducted on the example of a large area using multi-scale vegetation maps, geomorphologic maps, and WI distributions calculated from Landsat satellite data of 1988, 1989, 2013, and 2020. The index was calculated using the trapezoidal method based on diagrams characterizing the relationship between surface temperature LST (Land Surface Temperature) and vegetation index NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). The results of comparing WI moisture index distributions with a large-scale (M 1:10,000) landscape map of the test site showed a stable relationship between the degree of surface drainage of different tract types and changes in average WI index values. For phytocenoses and areas of open sands, there is a marked decrease in the WI index with increasing geomorphologic levels from laida to IV plain, which also indicates the informativeness of the WI index as an indicator of GVC

moisture content. The eight classes of phytocenoses represented on the medium-scale vegetation map (M 1:100,000) are divided into seven-eight stages according to the WI index at almost all geomorphologic levels, including floodplain, I-II terraces, III-terrace, and IV plain. The results indicate a relatively high informativeness of the WI index for studying, mapping and systematizing different types of phytocenoses of tundra zones by moisture content as the main parameter characterizing their thermophysical and thermal insulation properties.

Keywords: humidity, geomorphological levels, phytocenoses, systematization, Landsat satellites, temperature-vegetation index, tundra

Accepted: 15.05.2024 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-155-170

References

- 1. Andreyashkina N.I., Appraisal of modern condition of cover on watersheds of Yamal peninsula, *Vestnik OGU*, 2009, No. 12(106), pp. 16–23 (in Russian).
- Vasil'ev A. A., Oblogov G. E., Shirokov R. S., Long-term monitoring of the active layer thickness in typical tundras of the western Yamal, *Kriosfera Zemli*, 2023, Vol. 27, No. 4, pp. 3–13 (in Russian), DOI: 10.15372/ KZ20230401.
- 3. Elsakov V. V., Spectral differences in vegetation cover characteristics of tundra communities by Landsat sensors, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 92–101 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-92-101.
- 4. Kornienko S. G., Using thermal images from the Landsat-7 satellite for mapping tundra landscapes: the case of the Bovanenkovo–Baydaratskaya Bay gas pipeline section, *Aktual'nye problemy nefti i gaza*, 2020, Vyp. 3(30), pp. 51–63 (in Russian), DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-30.art6.
- 5. Kornienko S. G., Using images from Landsat satellites to characterize the transformations of the ground cover at the Bovanenkovo–Baydaratskaya bay section of the route of the Bovanenkovo–Ukhta gas pipeline, *Aktual'nye problemy nefti i gaza*, 2022, Vyp. 4(39), pp. 126–147 (in Russian), DOI.org/10.29222/ ipng.2078-5712.2022-39.art10.
- 6. Kornienko S. G., Yakubson K. I., Dubrovin V.A., Kritsuk L. N., Yastreba N. V., Aerospace geocryological monitoring of the Bovanenkovo–Baidaratskaya Guba gas pipeline route, *Gazovaya promyshlennost*', 2013, No. 7, pp. 24–27 (in Russian).
- 7. Kritsuk L. N., Dubrovin V.A., Maps of geocryological zoning as the basis of the geoecological assessment of the developed territory of the permafrost zone, *Razvedka i okhrana nedr*, 2003, No. 7, pp. 12–15 (in Russian).
- 8. Morozova L. M., Magomedova M. A., *Struktura rastitel'nogo pokrova i rastitel'nye resursy poluostrova Yamal* (Land cover structure and plant resources of the Yamal Peninsula), Ekaterinburg: Publ. House Ural Federal University, 2004, 63 p. (in Russian).
- 9. Carlson T., An Overview of the "Triangle Method" for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery, *Sensors*, 2007, Vol. 7, pp. 1612–1629, https://doi.org/10.3390/s7081612.
- Elsakov V. V., Kaverin D. A., Shchanov V. M., The study of seasonal vertical changes of ground surface in the Polar Ural foothills based on field measurements and alos palsar radar interferometry, *Earth's Cryosphere*, 2021, Vol. 25, No. 5, pp. 36–46, DOI: 10.15372/KZ20210505.
- 11. 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, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- 12. Garcia M., Fernández N., Villagarcía L. et al., Accuracy of the Temperature–Vegetation Dryness Index using MODIS under water-limited vs. energy-limited evapotranspiration conditions, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 149, pp. 100–117, DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.002.
- 13. Langer M., Westermann S., Muster S. et al., The surface energy balance of a polygonal tundra site in northern Siberia – Part 1: Spring to fall, *The Cryosphere*, 2011, No. 5, pp. 151–171, DOI:10.5194/tc-5-151-2011.
- 14. Nutini F., Boschetti M., Candiani G. et al., Evaporative fraction as an indicator of moisture condition and water stress status in semi-arid rangeland ecosystems, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 6300–6323, DOI: 10.3390/rs6076300.
- 15. Soudzilovskaia N.A., Van Bodegom P.M., Cornelissen J.H.C., Dominant bryophyte control over highlatitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation, *Functional Ecology*, 2013, No. 27, pp. 1442–1454, DOI: 10.1111/1365-2435.12127.
- 16. Tucker C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, Vol. 8, pp. 127–150, DOI:10.1016/0034-4257(79)90013-0.

- 17. 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, DOI:10.1016/j. rse.2003.11.005.
- 18. Xu H., Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, No. 14, pp. 3025–3033, DOI: 10.1080/01431160600589179.