

# Анализ информативности температурно-вегетационного индекса при решении задач мониторинга влажности напочвенного растительного покрова тундровой зоны (на примере полигона Бованенковского месторождения, полуостров Ямал)

С. Г. Корниенко

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

Влажность напочвенного растительного покрова (НРП) тундровых зон относится к числу основных факторов, влияющих на состояние и деградацию мёрзлых грунтов в условиях потепления климата и антропогенного воздействия. На примере полигона Бованенковского месторождения (полуостров Ямал) впервые рассмотрена возможность применения температурно-вегетационного индекса WI (*англ.* Wet Index) для характеристики многолетних и краткосрочных изменений влажности НРП и субстратов до глубины проникновения суточных колебаний температуры. Анализ проводился на основе снимков со спутников Landsat летних съёмки (июль–август) за период с 1984 по 2023 г. в районах техногенной нагрузки, а также на различных геоморфологических уровнях и участках фоновой области полигона. В работе дополнительно использовались временные ряды индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), характеризующего концентрацию зелёной массы растительности, индекса NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index) для оценки влажности на поверхности покрова, а также параметра, характеризующего суммарную площадь водоёмов (СПВ). В отличие от индексов NDVI, NDWI и СПВ, сезонные (летние) изменения индекса WI явно не зависят от температуры воздуха и характеризуются постепенным снижением WI от начала июля к концу августа, что соответствует тенденциям постепенного роста температуры и увеличения глубины сезонно-талого слоя. На участке более длительного антропогенного воздействия и на примыкающем к нему участке поймы фоновой области отмечаются наиболее существенные (значимые) тренды снижения WI, нормализованного относительно всей фоновой области. Данный факт скорее свидетельствует о влиянии климатического потепления, однако влияние антропогенных факторов также не исключается. Выявленные различия многолетних изменений нормализованных относительно фоновой области индексов WI, NDWI и NDVI на различных геоморфологических уровнях могут быть признаками разной реакции типов криогенного ландшафта на потепление климата. Схожие тенденции изменения индексов указывают на их взаимную связь и приуроченность к трансформациям НРП. Приведены примеры краткосрочных аномальных изменений индекса WI, связанных со спуском воды из озёр и строительством объектов, в том числе с образованием новых водоёмов, что подтверждает достаточно высокую его информативность при решении задач мониторинга и динамического картографирования влажности НРП тундровых зон.

**Ключевые слова:** Бованенковское месторождение, влажность, напочвенный растительный покров, потепление климата, температурно-вегетационный индекс, тренды, тундра, Landsat

Одобрена к печати: 14.01.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-131-147

## Введение

Развитие методов мониторинга напочвенного растительного покрова (НРП) в районах арктических и субарктических тундр обусловлено необходимостью получения объективной информации об изменениях состояния криогенного ландшафта, в том числе связанных с потеплением климата и антропогенным воздействием. Процессы деградации многолетнемёрзлых пород, сопровождающиеся ростом эмиссии парниковых газов, в значительной степени связаны с изменением компонент теплового баланса у поверхности, в том числе изменением влажности НРП, от которой в существенной степени зависят его теплоизоляционные свойства. Известно, что при прочих равных условиях снижение влажности сезонно-талого слоя

(СТС) приводит к увеличению его глубины и растеплению мерзлоты (Васильев и др., 2023). Сильное переувлажнение грунтов также может вызывать увеличение глубины СТС (Elsakov et al., 2021). Вблизи технических объектов нарушение естественного баланса влажности поверхности может служить триггером активизации опасных геокриологических процессов, таких как термокарст, термоэрозия, подтопление, заболачивание, морозное пучение, солифлюкция (сползание грунта). В этой связи для осваиваемых районов Арктики и Субарктики актуальны обновляемые картографические модели, характеризующие локальные изменения влажности НРП, связанные со строительством и функционированием технических объектов, в том числе в условиях потепления климата.

В центральной и западной части полуострова Ямал увеличение глубины СТС и деградация мерзлоты связывается с повышением среднегодовой температуры воздуха (Ardelean et al., 2020). Учитывая сильную неоднородность поверхности тундровых зон, разнообразие факторов, влияющих на состояние мерзлоты, а также вероятность существования обратных связей, трансформация компонент ландшафта и их реакция на потепление может идти с разной интенсивностью и неоднозначно (Анисимов, Шерстюков, 2016; Конищев, 2009). В этой связи интерес представляют сведения, касающиеся направленности и степени влияния потепления на изменение влажности НРП различных типов криогенного ландшафта. Проводимые до настоящего времени наземные наблюдения поверхности криогенных ландшафтов непродолжительны, носят фрагментарный (локальный) характер и пока не позволяют делать какие-либо выводы о характере влияния потепления на изменение влажности НРП. Принимая во внимание нестабильность гидрологического режима поверхности крупных районов тундры и существенную её неоднородность, анализ многолетних изменений влажности НРП реально может проводиться только с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Существующие доступные информационные продукты для характеристики влажности поверхности, основанные на использовании данных микроволновых радиометров, имеют очень низкое пространственное разрешение и не позволяют проводить анализ даже в региональном масштабе, не говоря уже о выявлении изменений на локальном уровне, в том числе с учётом особенностей ландшафта.

Результаты применения температурно-вегетационного индекса WI (*англ.* Wet Index) для картографического моделирования влажности различных типов НРП (фитоценозов) тундровых зон (Корниенко, Елсаков, 2024) свидетельствуют о принципиальной возможности его использования при решении задач регионального и локального мониторинга, поскольку пространственные закономерности могут служить аналогами при характеристике изменений состояния поверхности во времени.

Цель работы — на примере полигона Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) оценить информативность индекса WI для характеристики многолетних и краткосрочных изменений влажности НРП тундровой зоны.

### Характеристика района исследований

Территория полигона Бованенковского НГКМ размерами 50×50 км расположена в центральной части полуострова Ямал (*рис. 1а*, см. с. 133) и включает в себя участки ненарушенного (фоновое) состояния НРП и район размещения технических объектов (см. *рис. 1б*). Территория относится к северным субарктическим тундрам со сплошным распространением многолетнемёрзлых пород и подземными льдами различного происхождения. В геоморфологическом плане (см. *рис. 1б*) территория полигона приблизительно в равных долях делится на современные поймы рек и районы, включающие по мере повышения высотных отметок I, II, III террасы, IV (*а*) и IV (*б*) равнины (Крицук, Дубровин, 2003). С точки зрения возможных трансформаций ландшафта наибольший интерес представляют поймы рек, поскольку в их границах сосредоточена основная часть промышленных и инфраструктурных объектов.

Для территории полигона, относящейся к сравнительно плоской равнинной местности, характерна сильная неоднородность фитоценозов, высокая заболоченность и обводнённость преимущественно за счёт озёр термокарстового генезиса. Растительный покров представ-

лен лишайниково-моховыми, кустарничково-моховыми, травяно-моховыми фитоценозами (Морозова, Магомедова, 2004) мощностью от 2 до 15 см.

Для оценки многолетних доминирующих тенденций изменения влажности НРП, обусловленных возможным техногенным влиянием, анализировались два крупных участка более раннего (А, южный свод месторождения, см. рис. 1б) и более позднего (Б) строительства объектов. Для иллюстрации изменений влажности поверхности, связанных с дренированием озёр и строительством объектов, на участках В и Г (см. рис. 1б) проводился более детальный анализ изменений поверхности на разных интервалах времени. Отдельные нарушения napочвенного покрова отмечаются в районе А с 1984 г., интенсивное строительство регистрируется с 2009 г., ввод в эксплуатацию первой очереди месторождения был осуществлён в октябре 2012 г.

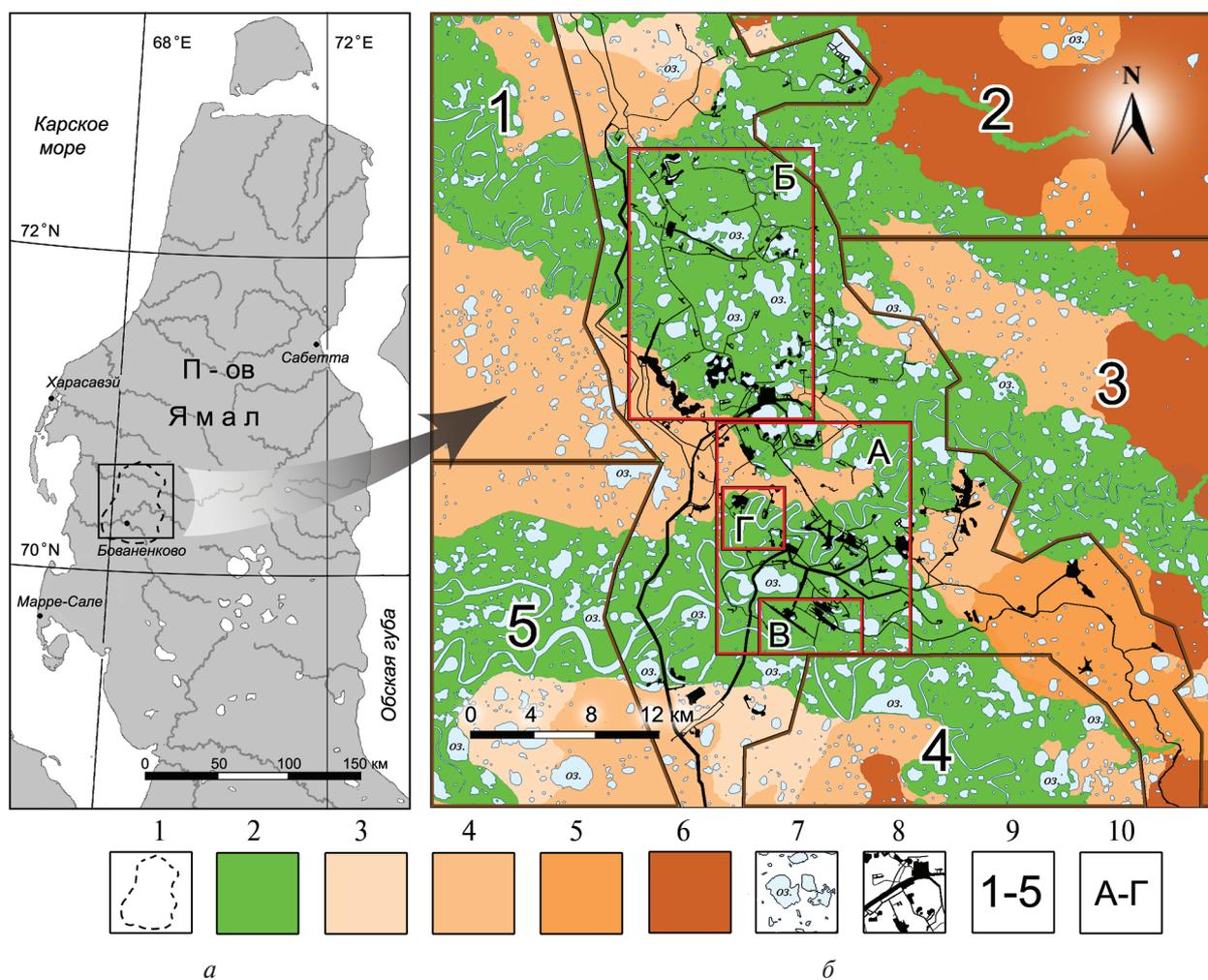


Рис. 1. Схематическое расположение полигона Бованенковского НГКМ на полуострове Ямал (а) и районов анализа по данным спутников Landsat (б). 1 — контур Бованенковского НГКМ; 2 — современные поймы рек; 3 — I и II террасы; 4 — III терраса; 5 — IV (а) равнина; 6 — IV (б) равнина; 7 — водные объекты; 8 — промышленные и инфраструктурные объекты; 9 — участки фоновой области; 10 — участки анализа в районе расположения технических объектов

### Исходные данные и методика исследований

В работе использовались 20 снимков со спутников Landsat-4, -5, -7, -8 уровня обработки L1 (табл. 1) за период с 1984 по 2023 г. Изображения отбирались только для безоблачных дней с датами съёмки в июле–августе и при отсутствии осадков как минимум за три дня

до съёмки. Предварительная обработка снимков включала радиометрическую калибровку спектральных каналов и формирование фрагментов на территорию полигона. Для устранения пробелов в изображениях, связанных со сбоями в работе радиометра ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus) (Landsat-7), снимки 2003, 2005 и 2007 гг. съёмки корректировались с использованием алгоритма SLC-off в программном комплексе ENVI 5.3 (<https://gis.stackexchange.com/questions/75151/fixing-landsat-7-slc-off-in-envi>).

Таблица 1. Используемые в работе снимки со спутников Landsat

Дата съёмки	Год от начала периода наблюдений	Спутник	Местное время съёмки	Кадр (Path; Row)
28.07.1984	1	Landsat-5	11:39	166;10, 166;11
31.07.1988	5	Landsat-4	11:39	166;10, 166;11
20.07.1990	7	Landsat-5	11:39	167;10
15.07.1994	11	—	11:34	167;10
07.07.2000	17	Landsat-7	12:08	167;10
10.08.2003	20	—	11:58	166;10, 166;11
31.08.2005	22	—	11:59	166;10, 166;11
11.07.2007	24	—	12:06	167;10
25.07.2009	26	Landsat-5	12:06	167;10
14.07.2011	28	—	12:05	167;10
19.07.2013	30	Landsat-8	12:18	167;10
12.08.2016	33	—	12:16	167;10
23.07.2017	34	—	12:10	166;10, 166;11
22.07.2020	37	—	12:17	167;10
31.07.2023	40	—	12:16	167;10

Примечание: Path — колонка; Row — ряд.

Расчёт температурно-вегетационного индекса WI проводился в соответствии с методикой, описанной в работе (Корниенко, Елсаков, 2024) на основе вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) (Tucker, 1979) и температуры поверхности (*англ.* Land Surface Temperature) (Weng et al., 2004). Поскольку в расчётах используется температура поверхности, индекс WI характеризует влажность приповерхностного слоя, включающего НПП и подстилающие субстраты до глубины проникновения суточных колебаний температуры, что вместе составляет первые десятки сантиметров (Schieldge et al., 1980). Дополнительно рассчитывался спектральный индекс влажности NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index) (Gao, 1996), характеризующий содержание влаги непосредственно на поверхности покрова. Для маскирования водных объектов и характеристики изменений их площади рассчитывался индекс MNDWI (*англ.* Modified Normalized Difference Water Index) (Xu, 2006). Участки без растительного покрова определялись по значениям индекса NDVI < 0,18 (Корниенко, 2022).

Известно, что характеристики спектральных каналов радиометров TM (*англ.* Thematic Mapper) (Landsat-4, -5), ETM+ (Landsat-7) и OLI (*англ.* Operational Land Imager) (Landsat-8, -9) отличаются, что приводит, в частности, к завышению индекса NDVI, рассчитанного по данным радиометра OLI в сравнении со значениями, вычисленными по данным радиометров ETM+ и TM. В этой связи коэффициенты отражения используемых каналов радиометров ETM+ и OLI приводились в соответствие радиометру TM на основе кросс-калибровки по формулам, предложенным в работах (Teillet et al., 2001; Roy et al., 2016).

Следует учитывать, что изменение климата и антропогенное воздействие если и оказывают влияние на трансформацию криогенного ландшафта, то очень незначительное, и признаки этих изменений, выявляемые по данным ДЗЗ, могут маскироваться более существен-

ными неинформативными (условно) факторами. К их числу относятся различия фенологического состояния поверхности, количества выпавших осадков, времени схода паводковых вод, метеорологических условий, состояния атмосферы, а также различия калибровочных характеристик радиометров Landsat. В этой связи для снижения влияния этих факторов применялась методика относительной радиометрической нормализации распределения индексов WI, NDVI и NDWI, описанная в работе (Корниенко, 2022). Нормализация распределения индексов каждого года съёмки осуществлялась относительно их значений 1990 г. (опорного) по участкам фоновой области. В соответствии с этим подходом межгодовые вариации индексов WI, NDVI и NDWI в границах отдельных сравниваемых участков в меньшей степени будут зависеть от перечисленных выше неинформативных факторов влияния.

Дополнительно проводился анализ динамики суммарной площади водоёмов (СПВ) с площадью более 0,01 км<sup>2</sup> на участках техногенной нагрузки и на участках фоновой области. Кроме традиционных подходов характеристики многолетних и сезонных изменений абсолютных значений параметра СПВ применялась методика относительной оценки его изменений по параметру  $\beta$ , позволяющая минимизировать влияние неинформативных факторов. Расчёт  $\beta$  проводился по формуле (Корниенко, 2023):

$$\beta = \text{СПВ} / \text{СПВ}_\phi,$$

где  $\text{СПВ}_\phi$  — суммарная площадь водоёмов всей фоновой области.

В работе также рассматривались многолетние и сезонные (летние) вариации температуры воздуха по данным метеорологической станции Марре-Сале (см. *рис. 1а*). Статистическая значимость трендов изменения средних значений индексов WI, NDVI, NDWI и параметра  $\beta$  проводилась на основе непараметрического теста Манна–Кендалла (Mann, 1945) с уровнем порога значимости  $\alpha = 0,1$ .

## Результаты исследований и их обсуждение

На *рис. 2* (см. с. 136) приведены графики многолетних изменений исходных (ненормализованных) средних значений индексов NDVI, NDWI, WI и СПВ для пойм, всех террас и равнин (далее террас), относящихся к фоновой области полигона, а также уравнения их аппроксимации. Для индекса NDVI (см. *рис. 2а*) характерно разнонаправленное изменение трендов для террас и пойм, причём для террас значения NDVI в среднем выше, чем для пойм. Для индексов NDWI и WI также отмечаются схожие разнонаправленные тренды изменения для пойм и террас, причём в среднем для пойм величина индексов NDWI и WI выше, чем для террас (см. *рис. 2б, в*), что ранее отмечалось в работе (Корниенко, Елсаков, 2024). Для параметра СПВ отмечаются тренды незначительного снижения средних значений как для пойм, так и для террас (см. *рис. 2г*).

Тренды всех параметров (см. *рис. 2*) слабо выражены, незначимы и характеризуются низкими значениями коэффициентов детерминации ( $R^2$ ) и коэффициентов ( $a$ ) в уравнениях аппроксимации при аргументе. В то же время схожие, разнонаправленные изменения индексов вне района технических объектов могут быть приняты во внимание как признаки различий изменения состояния НРП пойм и террас, обусловленного потеплением климата.

Практически идентичные межгодовые вариации всех параметров по поймам и террасам (см. *рис. 2*) свидетельствуют о приблизительно одинаковой их реакции на влияние перечисленных выше неинформативных факторов. Существенную роль в межгодовых вариациях анализируемых параметров играют сезонные (в течение лета) изменения состояния НРП тундровой зоны, значимость и влияние которых при анализе многолетних трендов исследованы не в полной мере. Учитывая ограниченное число безоблачных дней (за июль — август одного года), а иногда и полное их отсутствие, на данную территорию практически невозможно получить достаточное количество снимков для характеристики средних за сезон значений параметров. В то же время, как видно из *табл. 1*, съёмка со спутников Landsat каждого года проводилась в разные даты июля и августа. В этой связи была предпринята попытка охарактеризовать сезонные (летние) вариации параметров с использованием этих данных.

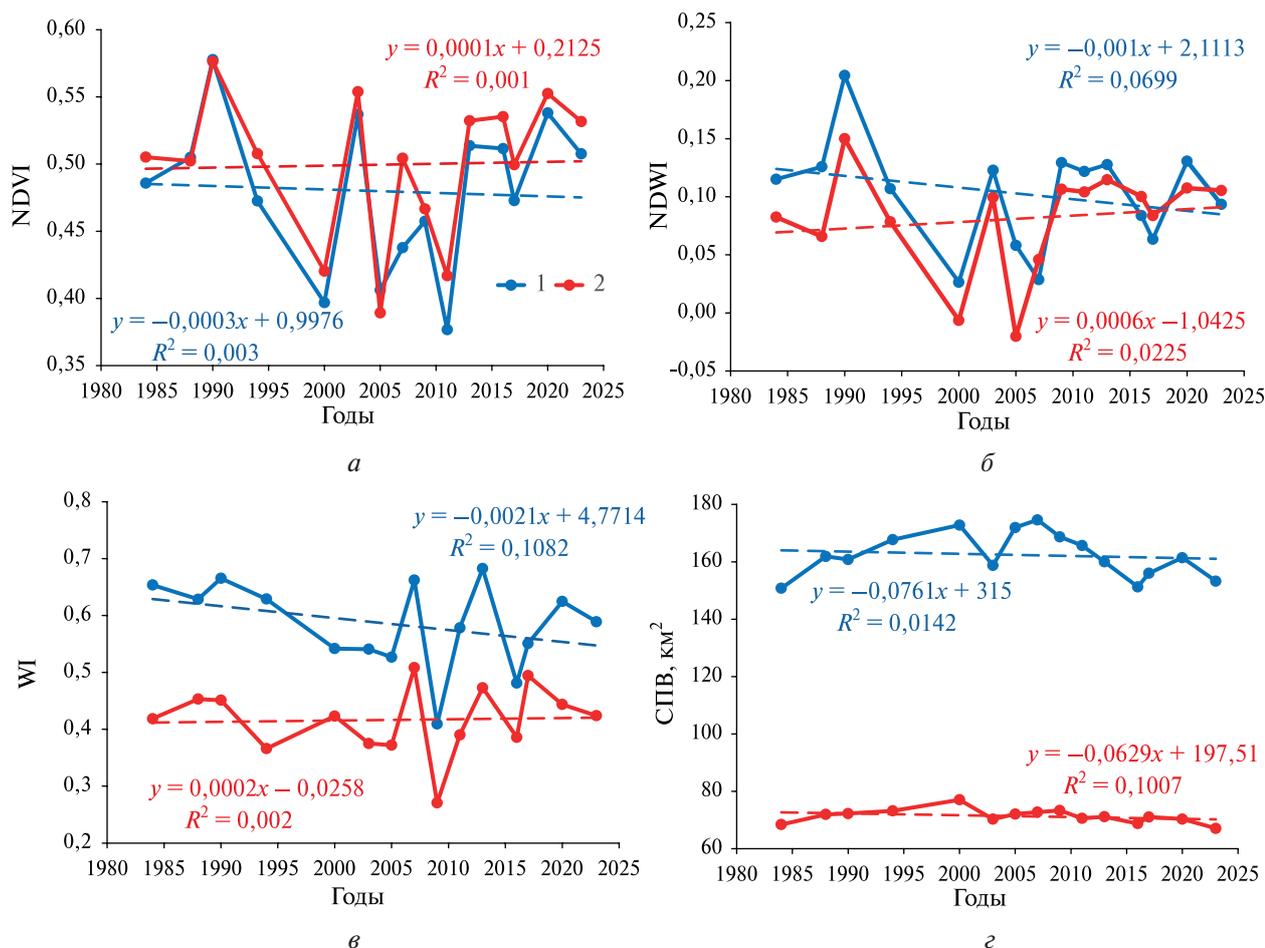


Рис. 2. Многолетние изменения средних значений индексов NDVI (а), NDWI (б), WI (e) и СПВ (z) в поймах (1) и на террасах (2) фоновой области

На рис. 3 (см. с. 137) приведены графики, характеризующие сезонные вариации исходных (ненормализованных) средних значений индексов NDVI, NDWI, WI и СПВ по поймам и террасам фоновой области, а также графики сезонных вариаций среднесуточной температуры воздуха ( $T$ ) по данным станции Марре-Сале на даты съёмки со спутников и, для сравнения, по ежедневным наблюдениям в 2021 г. Для корректного сопоставления все распределения аппроксимированы параболическими уравнениями. По кривым аппроксимации индексы NDVI (см. рис. 3а) и NDWI (см. рис. 3б) достигают максимума в конце июля и начале августа, когда практически в это же время отмечаются минимальные значения СПВ (см. рис. 3г). Подобное совпадение неслучайно и связано с изменением температуры воздуха. Сравнение кривых аппроксимации температуры воздуха на даты съёмки со спутников (см. рис. 3д) и по ежедневным наблюдениям, в частности в 2021 г. (см. рис. 3е), показывает, что по тем и другим данным температура воздуха достигает максимума приблизительно в одно и то же время — в конце июля — начале августа. Достаточно схожий характер кривых аппроксимации температуры воздуха по обоим наборам данных (см. рис. 3д, e) указывает на возможность анализа сезонных вариаций индексов NDVI, NDWI, WI и СПВ по используемым в настоящей работе данным съёмки со спутников Landsat разных лет.

В период максимальной температуры воздуха формируется наибольший объём зелёной растительной массы, что соответствует максимальным значениям индексов NDVI и NDWI. В этот же период наблюдается минимум СПВ, что может объясняться максимальным испарением с поверхности водоёмов и снижением количества осадков.

В то же время вариации температуры воздуха в эти месяцы явно никак не отражаются на сезонном ходе индекса WI (см. рис. 3в). Максимальные значения WI наблюдаются в начале

июля, а минимальные — в конце августа. В этот же период, в связи с сезонным прогревом поверхности, отмечается постепенное повышение температуры сезонно-талого слоя и увеличение его глубины (Васильев и др., 2023).

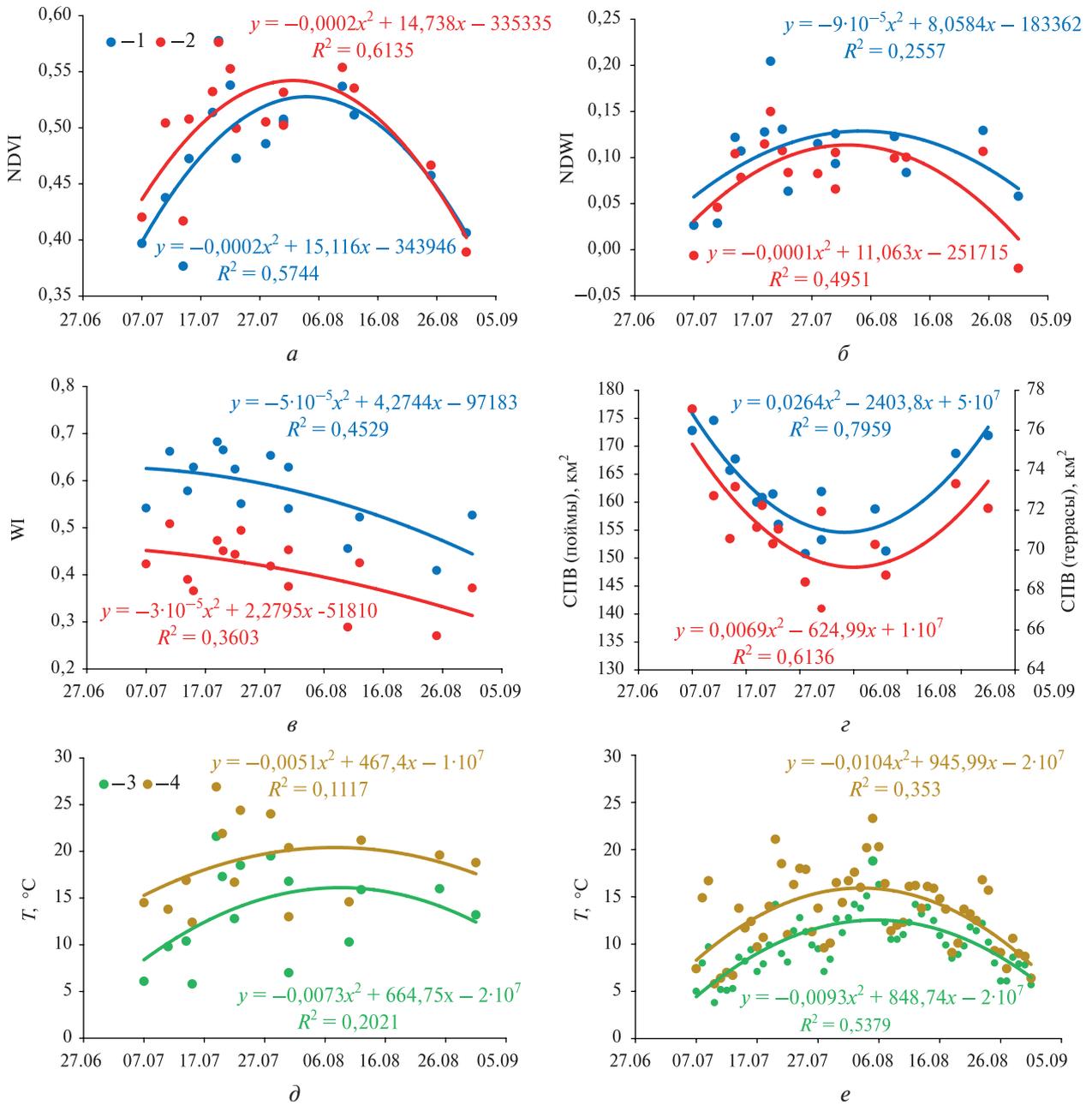


Рис. 3. Сезонные (летние) изменения средних значений индексов NDVI (а), NDWI (б), WI (в) и СПВ (г) по районам фоновой области, а также вариации среднесуточной температуры воздуха (Т) по данным станции Марре-Сале на даты съёмки со спутников Landsat (д) и по ежедневным наблюдениям в 2021 г. (е). 1 — поймы рек, 2 — террасы, 3 — среднесуточные значения температуры воздуха, 4 — максимальные значения температуры воздуха

Схожий характер сезонных вариаций индексов WI, NDVI, NDWI и СПВ в границах пойм и террас (см. рис. 2, 3) свидетельствует о возможности применения методики радиометрической нормализации, а также расчёта относительного параметра  $\beta$  для характеристики многолетних трендов их изменения на отдельных выбранных участках относительно всей фоновой области.

На рис. 4 представлены графики многолетнего изменения средних значений нормализованного индекса WI на участках А и Б в границах поймы района расположения технических объектов (см. рис. 1б).

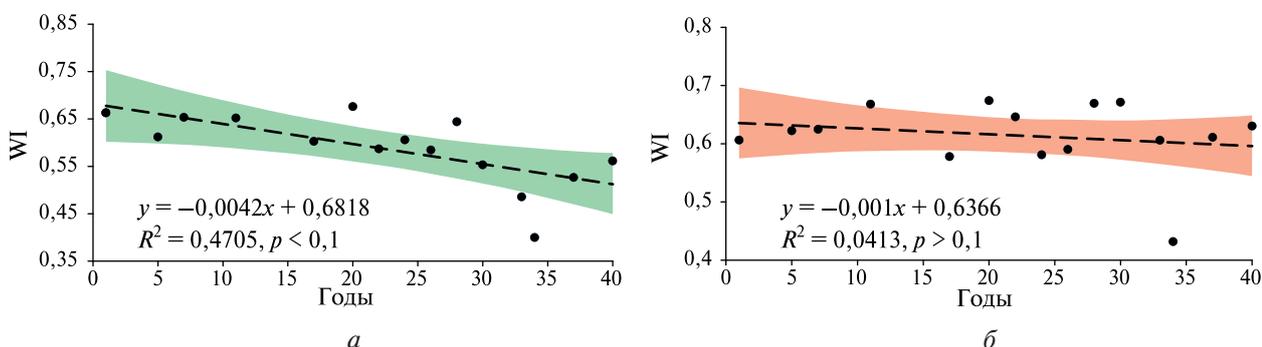


Рис. 4. Многолетние изменения средних значений нормализованного индекса WI в поймах на участках расположения технических объектов А (а) и Б (б)

На графиках приведены уравнения аппроксимации трендов, коэффициенты детерминации и границы доверительной вероятности. Оба тренда имеют отрицательный наклон ( $a < 0$ ), что соответствует снижению влажности относительно фоновой области, однако тренд значим ( $p < 0,1$ ) только для участка А (см. рис. 4а). Снижение влажности НРП на этом участке может объясняться влиянием антропогенной нагрузки в случае отсутствия аналогичных изменений индекса WI на участках фоновой области. В этой связи были построены аналогичные распределения WI и определены их статистические характеристики по участкам (1–5) фоновой области отдельно для пойм и террас для сравнения с параметрами на участках А и Б (табл. 2). Значения параметров, относящиеся к значимым трендам ( $p < 0,1$ ), выделены полужирным начертанием. На всех пяти участках фоновой области в границах пойм тренды индекса WI имеют коэффициент  $a < 0$ , что указывает на тенденции снижения влажности НРП, относительно всей фоновой области, однако тренды значимы только для участков 5 и А в пойме.

Таблица 2. Характеристики многолетних трендов средних значений нормализованного индекса WI по участкам анализа

Параметр	Участки						
	1	2	3	4	5	А	Б
<i>Поймы</i>							
<i>a</i>	-0,0008	-0,0002	-0,0002	-0,0028	<b>-0,0055</b>	<b>-0,0042</b>	-0,0010
<i>R</i> <sup>2</sup>	0,0174	0,0019	0,0036	0,2397	<b>0,3986</b>	<b>0,4705</b>	0,0413
<i>p</i>	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	<b>&lt;0,1</b>	<b>&lt;0,1</b>	>0,1
<i>Террасы</i>							
<i>a</i>	-0,0003	0,0009	0,0025	0,000009	-0,0014	–	–
<i>R</i> <sup>2</sup>	0,0064	0,0361	0,2683	0,000002	0,0702	–	–
<i>p</i>	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	–	–

В табл. 3 и 4 приведены аналогичные характеристики многолетних трендов средних значений нормализованных индексов NDWI и NDVI для участков фоновой области, а также для участков А и Б в пойме.

Так же, как и для индекса WI для пойм, коэффициенты *a* в уравнениях трендов индексов NDWI и NDVI преимущественно отрицательные, а для террас в основном положительные.

Таблица 3. Характеристики многолетних трендов средних значений нормализованного индекса NDWI по участкам анализа

Параметр	Участки						
	1	2	3	4	5	А	Б
<i>Поймы</i>							
<i>a</i>	-0,0013	-0,0009	<b>-0,0007</b>	-0,0002	-0,0028	-0,0009	-0,0012
$R^2$	0,1752	0,3091	<b>0,3303</b>	0,0091	0,2580	0,1945	0,2544
<i>p</i>	>0,1	>0,1	<b>&lt;0,1</b>	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1
<i>Террасы</i>							
<i>a</i>	0,00007	0,0010	<b>0,0011</b>	<b>0,0013</b>	0,00006	–	–
$R^2$	0,0073	0,2845	<b>0,3816</b>	<b>0,3797</b>	0,0049	–	–
<i>p</i>	>0,1	>0,1	<b>&lt;0,1</b>	<b>&lt;0,1</b>	>0,1	–	–

Таблица 4. Характеристики многолетних трендов средних значений нормализованного индекса NDVI по участкам анализа

Параметр	Участки						
	1	2	3	4	5	А	Б
<i>Поймы</i>							
<i>a</i>	-0,0004	-0,0004	-0,0005	-0,00004	-0,0009	-0,0004	-0,0007
$R^2$	0,0689	0,2127	0,2467	0,0006	0,1280	0,0819	0,1820
<i>p</i>	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1
<i>Террасы</i>							
<i>a</i>	-0,00006	0,0005	0,0002	0,0008	0,0003	–	–
$R^2$	0,0074	0,1763	0,0184	0,2323	0,1714	–	–
<i>p</i>	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	–	–

Таблица 5. Характеристики многолетних трендов параметра  $\beta$  по участкам анализа

Параметр	Участки						
	1	2	3	4	5	А	Б
<i>Поймы</i>							
<i>a</i>	0,0001	0,0002	<b>-0,0005</b>	0,0001	0,0001	<b>0,0005</b>	0,0001
$R^2$	0,1458	0,2129	<b>0,4804</b>	0,0653	0,0038	<b>0,2873</b>	0,0445
<i>p</i>	>0,1	>0,1	<b>&lt;0,1</b>	>0,1	>0,1	<b>&lt;0,1</b>	>0,1
<i>Террасы</i>							
<i>a</i>	0,0001	0,0001	0,0001	<b>-0,0002</b>	<b>-0,0002</b>	–	–
$R^2$	0,2050	0,2829	0,2404	<b>0,8711</b>	<b>0,2453</b>	–	–
<i>p</i>	>0,1	>0,1	>0,1	<b>&lt;0,1</b>	<b>&lt;0,1</b>	–	–

На данном этапе оценки нет явных оснований связывать изменение индекса WI и, соответственно, влажности НРП на участке А с антропогенным воздействием, поскольку схожий тренд WI отмечается в пойме участка 5, относящегося к фоновой области (см. табл. 2). Таким образом, изменение влажности НРП на участках А и 5, скорее всего, связано с климатическим фактором. В границах террас на участках 2, 3 и 4 коэффициенты  $a > 0$  и все тренды WI не значимы.

По параметру  $\beta$  (табл. 5) отмечаются аномальные значимые тренды его повышения на участке А и снижения на участке 3. Теоретически такое перераспределение водных масс между соседними участками поймы (см. рис. 1б) может быть связано с антропогенным влиянием, поскольку по этим же данным до начала строительства в 2009 г. на участке А, также как и на участке 3, отмечался тренд снижения параметра  $\beta$ . В целом, в отличие от индексов WI, NDWI и NDVI, по параметру  $\beta$  очевиден паритет положительных и отрицательных значений коэффициента  $a$  на участках (1–5) поймы и террас фоновой области, что указывает на отсутствие явных различий в изменении СПВ для этих типов ландшафта.

На рис. 5 приведены графики, характеризующие многолетние тенденции изменения средних значений нормализованных индексов WI, NDWI, NDVI и параметра  $\beta$  на различных геоморфологических уровнях фоновой области (см. рис. 1б). Несмотря на относительно высокий разброс значений, для трендов индексов WI, NDWI, NDVI прослеживается практически идентичный характер изменений на разных геоморфологических уровнях. Для более низкой поймы отмечается заметное снижение по всем индексам ( $a < 0$ ), для промежуточных по высоте I–II и III террас наклон трендов всех параметров ближе к нулю, а для более высоких IV (а) и IV (б) равнин отмечается заметное повышение значений по всем индексам ( $a > 0$ ). Тренды изменения параметра  $\beta$  (логарифмический масштаб ординаты) по всем уровням в основном близки к нулю (см. рис. 5г) и не имеют каких-либо признаков связи с индексами WI, NDWI, NDVI.

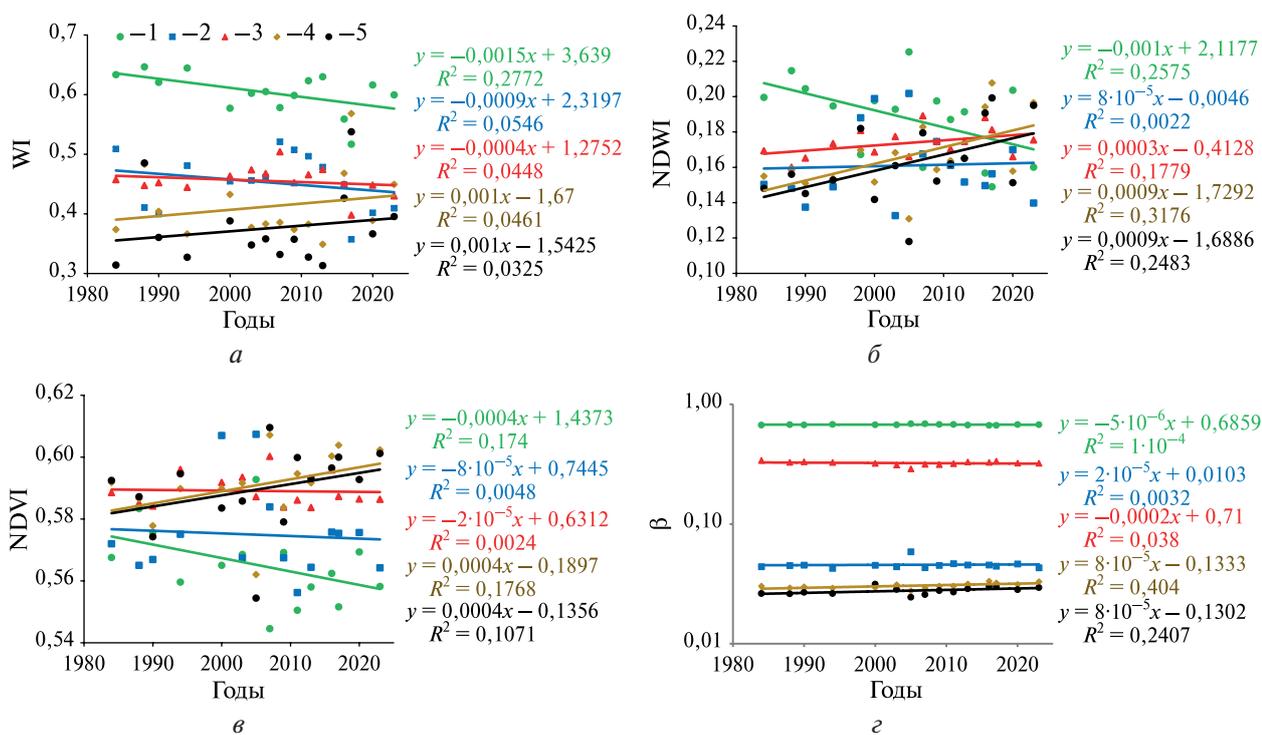


Рис. 5. Многолетние тенденции изменения средних значений нормализованных индексов WI (а), NDWI (б), NDVI (в) и параметра  $\beta$  (г) на различных геоморфологических уровнях фоновой области. 1 — поймы рек, 2 — I–II террасы, 3 — III терраса, 4 — IV (а) равнина, 5 — IV (б) равнина

В целом схожие тенденции изменения нормализованных индексов WI, NDWI и NDVI (см. табл. 2–4, рис. 5а–в) указывают на их взаимную связь, приуроченность к трансформациям НРП и могут служить подтверждением представлений о различной реакции типов криогенного ландшафта на потепление климата.

Для оценки информативности индекса WI при решении задач мониторинга могут быть использованы сведения, очевидным образом свидетельствующие об изменениях влажности поверхности, в том числе связанных со спуском воды в озёрах и строительством объектов.

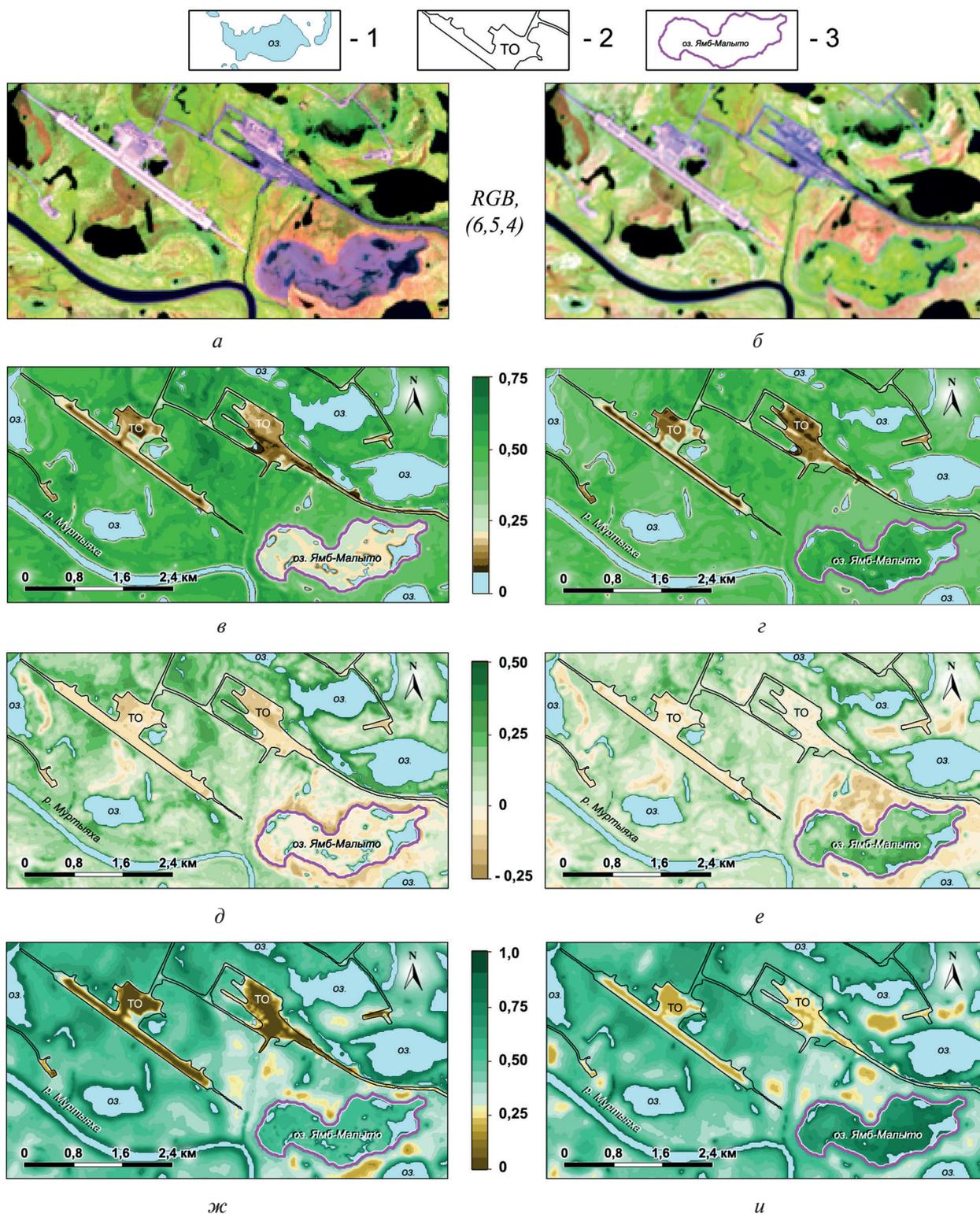


Рис. 6. Фрагменты карт, характеризующие состояние НПП на участке В в 2013 г. (а, в, д, ж) и в 2017 г. (б, з, е, и) по RGB-изображениям (а, б), нормализованным индексам NDVI (в, з), NDWI (д, е) и WI (ж, и). 1 — водные объекты, 2 — контуры технических объектов, 3 — границы хасырея (спущенного озера) Ямб-Мальто

Для иллюстрации связи, сходства и различий изменений индексов NDVI, NDWI и WI, а также для оценки информативности индекса WI как индикатора изменений влажности НПП на рис. 6 приведены фрагменты карт распределения этих параметров на участке В (см.

рис. 1б) по состоянию на 2013 и 2017 гг. в период после спуска озера Ямб-Малыто в 2012 г. и образования хасырея. RGB-изображение (R — *англ.* red; G — *англ.* green; B — *англ.* blue), синтезированное с использованием 6-го, 5-го и 4-го спектрального канала спутника Landsat-8, показывает, что в 2013 г. (см. рис. 6а), через год после спуска воды, дно озера по спектральным характеристикам близко к спектрам технических объектов (на песчаной отсыпке), что указывает на относительное сходство обоих типов поверхности.

Отсутствие растительности в границах хасырея в 2013 г. также отмечается по значениям индекса NDVI  $< 0,18$  (см. рис. 6в). По индексу NDWI хасырей и ряд участков вокруг него практически не отличаются от технических объектов (см. рис. 6д), что, в отличие от участков с НПП, указывает на отсутствие влаги на их поверхности.

Иная картина на дне спущенного озера (по сравнению с индексом NDWI) наблюдается по индексу WI. Для технических объектов отмечаются аномально низкие значения WI (см. рис. 6ж), что характерно для строительных сооружений при отсутствии испарения с поверхности. В то же время значения WI дна озера близки к средним значениям (0,5) для участков с НПП. Хасырей, по сути, представляет собой котловину, и после спуска воды донный грунт, как минимум до глубины суточных колебаний температуры, ещё содержит достаточно большое количество влаги. За счёт испарения и более высокой тепловой инерции влажных грунтов такие участки в дневное время характеризуются относительно низкой температурой поверхности и высоким индексом WI.

К 2017 г. дно хасырея зарастает гигрофитными фитоценозами (Московченко, 2013), о чём свидетельствуют изменения на RGB-изображении (см. рис. 6б) и аномально высокий индекс NDVI (см. рис. 6г). Соответственно с ростом зелёной массы увеличивается влажность на поверхности покрова и в слое суточных колебаний температуры, на что указывают аномально высокие индексы NDWI (см. рис. 6е) и WI (см. рис. 6и).

Изменение влажности НПП в пойменной части, связанное со строительством объектов, может быть проиллюстрировано фрагментами карт разности индексов  $\Delta WI$ ,  $\Delta NDWI$  и  $\Delta NDVI$  на участке Г (см. рис. 1б) за период с 2020 по 2023 г. (рис. 7, см. с. 143). В данном случае распределение нормализованных индексов 2020 г. вычиталось из распределения 2023 г. Приведённые на рис. 7 гистограммы разности распределения индексов построены для территории вне контуров технических объектов и водоёмов, поскольку в задачах мониторинга интерес представляют трансформации ландшафта на участках, явно не затронутых строительством. На фрагментах карт и гистограммах белым цветом обозначены области погрешностей нормализации, соответствующие максимальным значениям двух среднеквадратических отклонений. Из рис. 7 видно, что основная часть технических объектов на этом участке была построена после 2020 г. Очевидный факт заключается в том, что в контурах этих объектов строительства влажность поверхности аномально резко снижается, поскольку уничтожается растительный покров и проводится песчаная отсыпка под основание сооружений и дорог. В этой связи на участках 1, 2, 4 в границах построенных после 2020 г. объектов отмечается аномальное снижение индексов WI, NDWI и NDVI (см. рис. 7). В то же время на участках (1–4) (см. рис. 7а, б) рядом с этими техническими объектами отмечается аномальное повышение WI и NDWI, что указывает на существенный рост влажности НПП, связанный именно со строительством.

Повышение влажности здесь, скорее всего, обусловлено нарушением естественного поверхностного стока при строительстве, что в ряде случаев приводит к заболачиванию, подтоплениям, развитию термокарста и другим опасным геокриологическим процессам вблизи технических объектов. Подтверждением может служить образование новых водных поверхностей (подтоплений) на участках (1–3), непосредственно примыкающих к построенным объектам. Повышение влажности почвы и грунта, как правило, приводит к активному росту растительности, что подтверждается увеличением индекса NDVI, в данном случае на участках 1, 2 (см. рис. 7в). Наряду с фактами повышения влажности следует отметить случаи её уменьшения вблизи технических объектов, о чём в настоящем примере можно судить по снижению значений индексов WI, NDWI и NDVI на участке 5 рядом с объектом, построенным до 2020 г. (см. рис. 7).

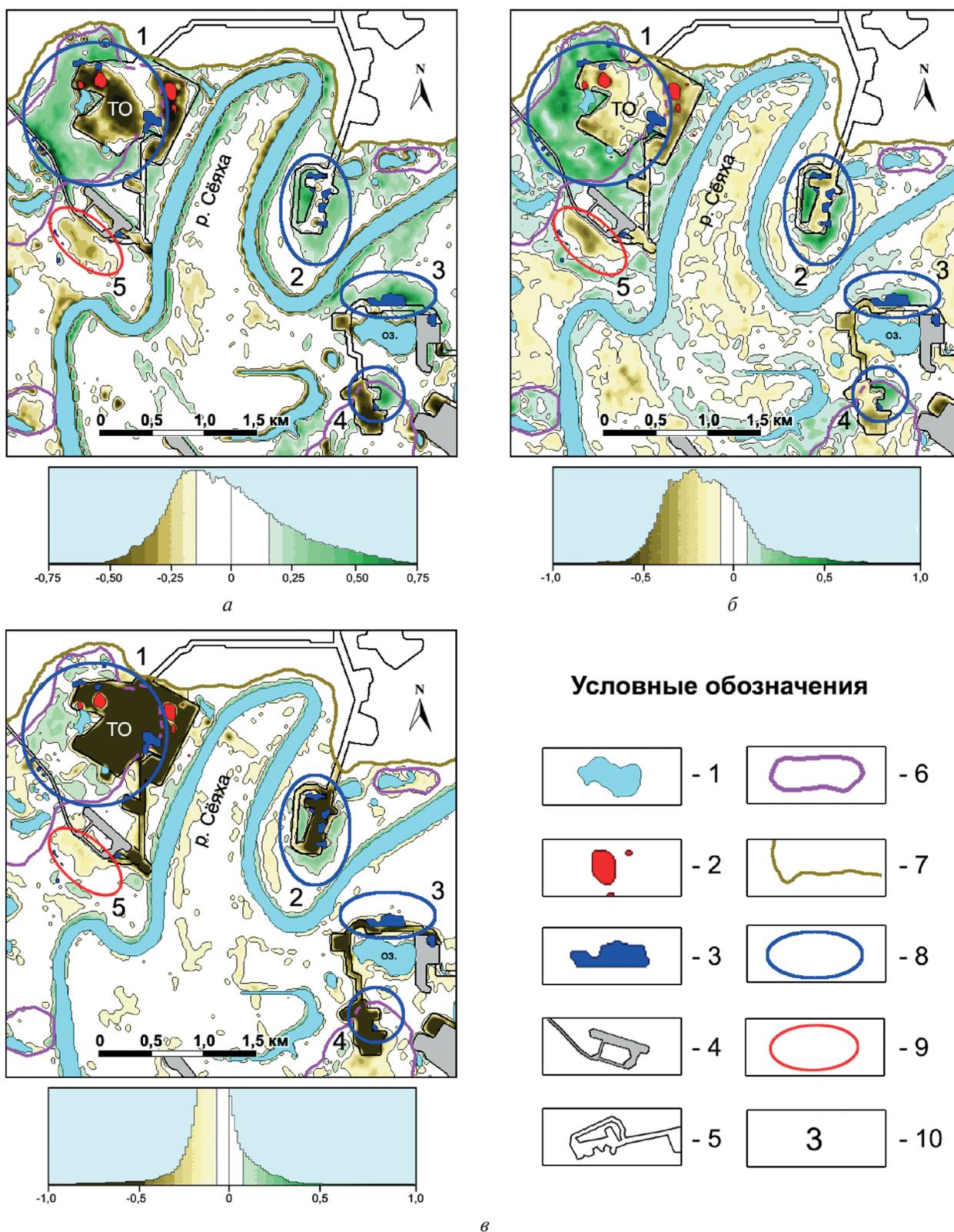


Рис. 7. Фрагменты карт и гистограммы распределений, характеризующие изменение разности значений нормализованных индексов  $\Delta WI$  (а),  $\Delta NDWI$  (б) и  $\Delta NDVI$  (в) на участке Г за период с 2020 по 2023 г. 1 — сохранившиеся водоёмы, 2 — исчезнувшие водоёмы, 3 — образовавшиеся водоёмы, 4 — технические объекты, построенные до 2020 г., 5 — контуры технических объектов, построенных после 2020 г., 6 — контуры хасыреев (спущенных озёр), 7 — граница между поймой и террасой, 8 — участки аномального повышения индекса WI вне технических объектов, 9 — участок аномального снижения индекса WI вне технических объектов, 10 — номера участков аномального изменения индексов WI, NDWI и NDVI

## Заключение

На примере полигона Бованенковского НГКМ впервые показана возможность использования температурно-вегетационного индекса WI, рассчитанного по данным спутников Landsat, для характеристики многолетних и краткосрочных изменений влажности напочвенного растительного покрова тундровых зон, обусловленных потеплением климата и антропогенным воздействием.

Сезонные (летние) изменения индекса WI, в отличие от индексов NDVI, NDWI и СПВ, явно не зависят от температуры воздуха и характеризуются постепенным снижением средних значений WI от начала июля к концу августа, что соответствует тенденциям роста глубины сезонно-талого слоя в летний период. Подобный факт может служить предпосылкой для более глубокого изучения связи индекса WI с глубиной СТС, в том числе для решения задач мониторинга состояния мёрзлых грунтов.

Применение методики относительной радиометрической нормализации позволило снизить маскирующее влияние сезонных вариаций индекса WI и выявить значимый ( $p < 0,1$ ) относительно фоновой области многолетний тренд его снижения на участке более раннего строительства объектов. Влияние антропогенных факторов на снижение влажности НПП в зонах техногенной нагрузки не исключается, однако в данном случае похожая тенденция изменения индекса WI на соседнем пойменном участке фоновой области с большей вероятностью указывает на влияние климатического фактора.

Наблюдаемые различия в доминирующих трендах многолетних изменений средних значений нормализованных индексов WI, NDVI и NDWI на разных геоморфологических уровнях с преобладанием их повышения на террасах и равнинах могут быть признаками разной реакции типов криогенного ландшафта на потепление климата. В то же время схожие тенденции изменения индексов указывают на их взаимную связь и приуроченность к трансформациям напочвенного растительного покрова.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой информативности индекса WI для решения задач мониторинга, картографирования и характеристики краткосрочных локальных изменений влажности НПП, связанных со строительством объектов, что подтверждается идентичными изменениями индекса NDWI. В то же время исследование показало, что в задачах геокриологического мониторинга индекс WI более информативен по сравнению с NDWI, поскольку рассчитывается по температуре поверхности и характеризует суммарную влажность НПП и подстилающих субстратов до глубины проникновения суточных колебаний температуры.

В целом полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения индекса WI для изучения, картографирования и характеристики многолетних и краткосрочных изменений влажности НПП тундровых зон, в том числе связанных с потеплением климата и антропогенным воздействием.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения ресурсов углеводородов шельфа и сопредельной суши арктических и субарктических регионов России в условиях меняющегося климата» (Рег. № FMME-2025-0008).

## Литература

1. Анисимов О. А., Шерстюков А. Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 2. С. 90–99.
2. Васильев А. А., Облогов Г. Е., Широков Р. С. Долговременный мониторинг глубины сезонного протавивания пород в типичных тундрах западного Ямала // Криосфера Земли. 2023. Т. 27. № 4. С. 3–13. DOI: 10.15372/KZ20230401.
3. Конищев В. Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 4. С. 10–20.

4. Корниенко С. Г. Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 106–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129.
5. Корниенко С. Г. Изучение динамики термокарстовых озёр в районе Ябургского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 246–260. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-246-260.
6. Корниенко С. Г., Елсаков В. В. Оценка информативности температурно-вегетационного индекса как индикатора влажности напочвенного растительного покрова тундровой зоны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 155–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-155-170.
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. Московченко Д. В. Особенности многолетней динамики растительности Бованенковского месторождения (полуостров Ямал) // Вестн. Тюменского гос. ун-та. 2013. № 12. С. 57–66.
10. Ardelean F., Onaca A., Chetan M.-A. et al. Assessment of spatio-temporal landscape changes from VHR images in three different permafrost areas in the Western Russian Arctic // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 23. Article 3999. DOI: 10.3390/rs12233999.
11. 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.
12. 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.
13. Mann H. B. Nonparametric tests against trend // Econometrica. 1945. V. 13. P. 245–259.
14. Roy D. P., Kovalskyy V., Zhang H. K. et al. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 185. P. 57–70. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.024.
15. Schieldge J. P., Kahle A. B., Alley R. E., Gillespie A. R. Use of thermal inertia properties for material identification // SPIE Image Processing for Missile Guidance. 1980. V. 238. P. 350–357.
16. Teillet P. M., Barker J. L., Markham B. L., Irish R. R., Fedosejevs G., Storey J. C. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets // Remote Sensing of Environment. 2001. V. 78. P. 39–54.
17. 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.
18. 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.
19. 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.

## Analysis of informativeness of the temperature-vegetation index in solving the tasks of monitoring moisture content of tundra ground cover (on the example of Bovanenkovo field polygon, Yamal Peninsula)

S. G. Kornienko

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

Moisture content of tundra ground vegetation cover (GVC) is one of the main factors affecting the condition and degradation of frozen soils under climate warming and anthropogenic impact. On the example of Bovanenkovo field polygon (Yamal Peninsula), the possibility of using the temperature-vegetation index WI (Wet Index) to characterize long-term and short-term changes in moisture content of the GVC and substrates to the depth of penetration of daily temperature fluctuations has been considered for the first time. The analysis was based on Landsat satellite images of summer (July–August) surveys from 1984 to 2023 in areas of anthropogenic load, as well as at different geomorphologic levels and sections of the background area of the landfill. Time series of NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) characterizing the concentration of green mass of vegetation, NDWI (Normalized Difference Water Index) estimating moisture on the cover surface, and a parameter characterizing total water body area (TWA) were additionally used in this work. In contrast to NDVI, NDWI and TWA, seasonal (summer) changes in WI are clearly independent of air temperature and are characterized by a gradual decrease in WI from the beginning of July to the end of August, which corresponds to the trends of gradual temperature rise and increase in the depth of the seasonally thawed layer. The site of longer anthropogenic impact and adjacent floodplain area of the background area show the most significant trends of decrease in WI normalized relative to the entire background area. This fact rather testifies to the influence of climatic warming, but the influence of anthropogenic factors cannot be excluded either. The revealed differences in multiyear changes of WI, NDWI and NDVI normalized relative to the background area at different geomorphological levels may be signs of different response of cryogenic landscape types to climate warming. Similar trends in the indices indicate their mutual relationship and timing to the transformations of the GVC. Examples of short-term anomalous changes in WI associated with water release from lakes and construction of objects, including formation of new reservoirs, are given, which confirms a sufficiently high informativeness of WI in solving the tasks of monitoring and dynamic mapping of moisture content in tundra GVC.

**Keywords:** Bovanenkovo field, moisture, ground vegetation cover, climate warming, temperature-vegetation index, trends, tundra, Landsat

Accepted: 14.01.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-131-147

### References

1. Anisimov O. A., Sherstiukov A. B., Evaluating the effect of environmental factors on permafrost in Russia, *Earth's Cryosphere*, 2016, V. 20, No. 2, pp. 90–99 (in Russian).
2. Vasil'ev A. A., Oblogov G. E., Shirokov R. S., Long-term monitoring of the depth of seasonal thawing of rocks in typical tundras of western Yamal, *Earth's Cryosphere*, 2023, V. 27, No. 4, pp. 3–13 (in Russian), DOI: 10.15372/KZ20230401.
3. Konishchev V. N., Permafrost response to climate warming, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya*, 2009, No. 4, pp. 10–20 (in Russian).
4. Kornienko S. G., Characteristics of anthropogenic transformations of landscapes in the area of Bovanenkovo gas field based on Landsat satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 2, pp. 106–129 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129.
5. Kornienko S. G., Studying the dynamics of thermokarst lakes in the area of the Yamburg gas field using Landsat satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 246–260 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-246-260.

6. Kornienko S. G., Elsakov V. V., Assessment of informativeness of temperature-vegetation index as an indicator of moisture content of tundra ground vegetation cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 155–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-155-170.
7. Kritsuk L. N., Dubrovin V. A., Maps of geocryological zoning as the basis of the geocological 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: Izd. Ural'skogo universiteta, 2004, 63 p. (in Russian).
9. Moskovchenko D. V., Peculiarities of long-term dynamics of vegetation at the Bovanenkovskoye field (Yamal Peninsula), *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, No. 12, pp. 57–66 (in Russian).
10. Ardelean F., Onaca A., Chetan M.-A. et al., Assessment of spatio-temporal landscape changes from VHR images in three different permafrost areas in the Western Russian Arctic, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 23, Article 3999, DOI: 10.3390/rs12233999.
11. 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, pp. 36–46, DOI: 10.15372/KZ20210505.
12. Gao B., NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, V. 58, pp. 257–266, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
13. Mann H. B., Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 1945, V. 13, pp. 245–259.
14. Roy D. P., Kovalsky V., Zhang H. K. et al., Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity, *Remote Sensing of Environment*, 2016, V. 185, pp. 57–70, DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.024.
15. Schioldge J. P., Kahle A. B., Alley R. E., Gillespie A. R., Use of thermal inertia properties for material identification, *SPIE Image Processing for Missile Guidance*, 1980, V. 238, pp. 350–357.
16. Teillet P. M., Barker J. L., Markham B. L., Irish R. R., Fedosejevs G., Storey J. C., Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets, *Remote Sensing of Environment*, 2001, V. 78, pp. 39–54.
17. Tucker C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, V. 8, pp. 127–150, DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
18. 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, pp. 467–483, DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.
19. 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, pp. 3025–3033, DOI: 10.1080/01431160600589179.