

ЗОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ТИПИЧНОЙ ТУНДРЫ В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА МАРРЕСАЛЯ, ПОЛУОСТРОВОВ ЯМАЛ)

С. Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2026 г.

Для цитирования

Корниенко С. Г. Зональные особенности изменения растительного покрова и влажности почвы типичной тундры в условиях потепления климата (на примере района Марресалья, полуостровов Ямал) // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 3. — С. 347—360. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-347-360.

Цель исследований — охарактеризовать обусловленные потеплением климата различия в изменении свойств растительности и влажности почвы разных типов ландшафта на разных геоморфологических уровнях, а также возможную связь этих изменений с геоэкологическими условиями. Исследование проводилось на участке тундры на полуострове Ямал с использованием данных со спутников Landsat за период с 1985 по 2024 гг. на основе вегетационного индекса NDVI, индекса влажности растительности NDWI и температурно-вегетационного индекса влажности почвы WI (Wet Index). Выявленные тренды изменения индексов свидетельствуют о доминирующем влиянии рельефа на темпы роста влажности почвы и растительности. Показано, что темпы изменения индексов могут рассматриваться в качестве индикаторов изменения глубины сезонно-талого слоя.

Ключевые слова: влажность почвы, изменение климата, геоэкологические условия, геоморфологические уровни, растительный покров, типы ландшафта, трендовый анализ, тундра, Landsat.

Введение

В последние десятилетия вопросы влияния глобального потепления на состояние криолитозоны продолжают широко обсуждаться мировой научной общественностью. Интерес к подобным исследованиям в основном вызван проблемой оценки эмиссии парниковых газов при растеплении мерзлоты, а также минимизацией рисков, связанных с развитием опасных геоэкологических процессов при освоении ресурсов Арктики и Субарктики. Общие выводы о деградации мерзлоты не могут в полной мере характеризовать ее изменения на региональном и локальном уровнях, поскольку направленность и темпы этих изменений зависят от многих факторов, в том числе от неоднородностей рельефа, типов ландшафта, типов растительности, состава и влажности почвы [1]. В этой связи важной задачей

является изучение роли и степени влияния тех или иных факторов на процесс трансформации криогенных ландшафтов.

В связи с возможностью использования свойств поверхности как индикаторов деградации мерзлоты проводятся исследования по выявлению связей между геоэкологическими условиями и состоянием растительности тундровых зон [2—5]. Считается, что при деградации мерзлоты и увеличении глубины сезонно-талого слоя (СТС) повышается влажность почвы и увеличивается биомасса самой растительности [6—8]. Также считается, что каждый тип ландшафта характеризуется определенным сочетанием особенностей рельефа, почв и растительного покрова. В то же время в районах тундры одни и те же типы ландшафта и растительного покрова могут встречаться на различных геоморфологических уровнях [9]. В этой связи при рассмотрении свойств

растительного покрова и влажности почвы в качестве возможных индикаторов состояния СТС одним из способов исследований может быть сравнительный анализ тенденций их изменения в границах разных типов ландшафта на разных геоморфологических уровнях.

Существенная неоднородность тундровых ландшафтов, значительные масштабы территорий, а также необходимость обновления информации о состоянии поверхности делают актуальными для районов Арктики разработку и адаптацию методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для анализа изменений растительности и влажности почвы. Оценка изменений свойств напочвенного растительного покрова (НРП) в арктических районах по данным ДЗЗ [1; 4; 6—8; 10—12] в большинстве случаев основана на применении вегетационных индексов, в частности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [13], характеризующего содержание зеленой фитомассы и хлорофилла в растительном покрове. Для характеристики влажности поверхности НРП может быть использован индекс NDWI (Normalized Difference Water Index) [9; 14; 15].

Известны методы, основанные на измерении температуры поверхности в сочетании с индексами растительности [16; 17], которые позволяют характеризовать влажность НРП и почвы в его корневой зоне [18] до глубины проникновения суточных колебаний температуры. Эта глубина составляет первые десятки сантиметров, включая толщину растительного покрова [19; 20]. Ранее на примере крупного района полуострова Ямал была показана достаточно высокая информативность температурно-вегетационного индекса WI (Wet Index) как индикатора влажности различных типов НРП (фитоценозов) [9], что свидетельствует о принципиальной возможности его использования для характеристики многолетних изменений влажности почвы в тундровых зонах.

Настоящее исследование проводилось на участке типичной тундры в районе полярной станции Марресала на западном побережье полуострова Ямал с использованием данных со спутников Landsat. Цели настоящего исследования: характеристика обусловленных потеплением климата различий в изменении свойств НРП и влажности почвы разных типов ландшафта на разных геоморфологических уровнях; характеристика связи изменений геокриологических условий с многолетними изменениями свойств НРП и влажности почвы.

Методическая новизна этого исследования состоит в применении температурно-вегетационного индекса WI для характеристики многолетних изменений влажности почвы тундровой зоны в комплексе с индексами NDVI и NDWI, характеризующими совокупный запас зеленой фитомассы НРП и влажность на поверхности растительного покрова. Связь индексов NDWI и WI с влажностью основывается на различных физических принципах, что при совместном их использовании позволяет подтвердить

достоверность трендов изменения влажности НРП и почвенного слоя.

Характеристика района исследований

Анализируемая территория размерами 3×3 км (рис. 1А, 1В) расположена на западном побережье полуострова Ямал (рис. 1С) в районе полярной метеорологической станции Марресала. Территория относится к типичным суб арктическим тундрам со сплошным распространением многолетнемерзлых пород и с подземными льдами различного происхождения. С поверхности залегают континентальные аллювиальные, золовые, озерно-болотные и прибрежно-морские песчано-супесчаные отложения [21]. Криогенная толща с подошвой мерзлого слоя на глубинах 40—90 м состоит из мерзлого и охлажденного ярусов. На территории широко распространены залегающие близко к поверхности подземные льды. Максимальная мощность ледяных тел наблюдается в пределах водораздельных холмов, сложенных с поверхности песками.

За исключением песчаных раздувов во всех ландшафтах с поверхности присутствует торфяной слой. В зависимости от типа ландшафта глубина сезонного оттаивания варьирует от 0,4 до 2,2 м. Более низкие значения глубины СТС характерны для ландшафтов с более высокой влажностью пород [21].

В геоморфологическом плане территория включает пойму реки Марре-Яха (на рис. 1А объединенную с лавой и песчаной отмелью) с перепадом высотных отметок от 0,5 до 5 м, а также I-II и III морские террасы с перепадами высоты рельефа 15—20 и 22—30 м соответственно [22]. Площадь внутренних водоемов составляет около 11% общей площади территории. Карта типов ландшафта в ранге урочищ представлена на рис. 1В [21]. Растительный покров представлен лишайниково-моховыми, кустарниково-моховыми, травяно-моховыми фитоценозами мощностью от 2 до 15 см с присутствием кустарников ивы высотой до 0,4 м [23]. Состав и доли покрытия видами растительного покрова для разных типов ландшафта подробно приведены в [21].

В настоящем исследовании из всех типов ландшафта рассматривались только пять (типы 9, 3, 8, 2, 6, см. рис. 1В), для которых в [23] приведены значения многолетних трендов изменения глубины СТС.

За последние 50 лет темпы повышения среднегодовой и средней летней температуры воздуха (по данным станции Марресала) составляют около 0,078°C и 0,063°C в год соответственно [23]. Сам район Марресала относится к биоклиматической подзоне Западной Сибири с наиболее высоким темпом потепления вечной мерзлоты, который составляет 0,056°C в год [7]. Кроме строений и оборудования, относящихся к метеорологической станции, в районе не отмечены признаки антропогенного или стихийного воздействия на ландшафт, поэтому любые изменения состояния его поверхности и мерзлоты здесь связаны только с изменением климата.

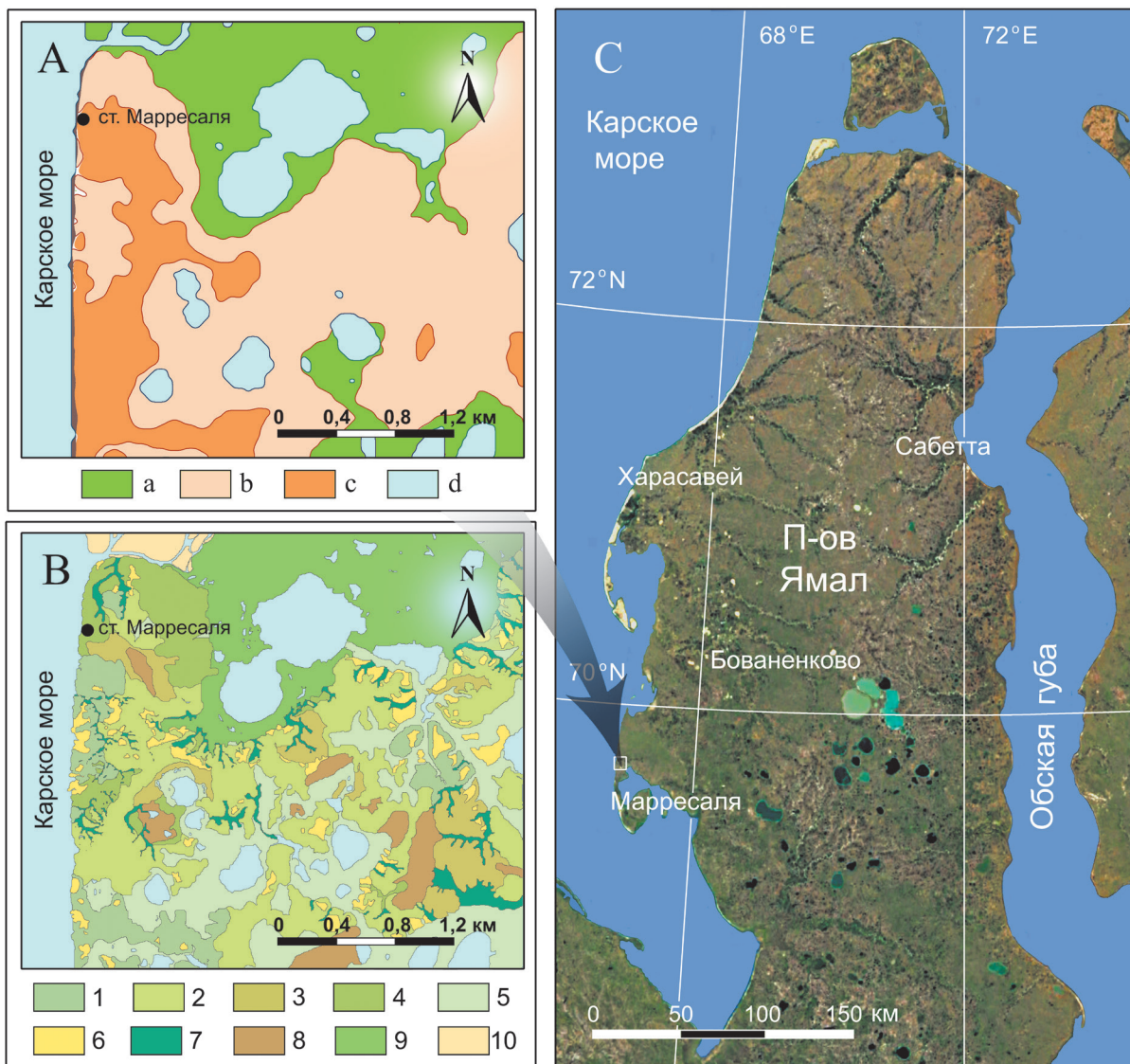


Рис. 1. Карты геоморфологических уровней (А) и типов ландшафта (В) [21] района Марресалья и его расположение на полуострове Ямал (С). Геоморфологические уровни: а – пойма, б – I-II террасы, с – III терраса, d – озера. Типы ландшафта: 1 – увлажненная тундра, 2 – дренированная тундра, 3 – полигональная тундра, 4 – насыщенная влагой тундра, 5 – озерные котловины, 6 – песчаные раздувы, 7 – водотоки и овраги, 8 – торфяники, 9 – торфяные болота, 10 – песчаные отмели
Fig. 1. Maps of geomorphological levels (A) and landscape types (B) [21] of the Marresal area and its location on the Yamal Peninsula (C). Geomorphological levels: a – floodplain, b – terraces I-II, c – terrace III, d – lakes. Landscape types: 1 – moist tundra, 2 – drained tundra, 3 – polygonal tundra, 4 – moisture-saturated tundra, 5 – lake beds, 6 – sand swells, 7 – streams and coombs, 8 – peatlands, 9 – peat bogs, 10 – sandbanks

Исходные данные и методика исследований

В работе использовались 43 снимка со спутников Landsat 5, 7, 8, 9 уровня обработки L1 (<https://glovis.usgs.gov/app>) за период с 1985 по 2024 гг., что согласуется с известными подходами к выбору снимков для анализа трендов изменения растительности в арктических зонах [10]. Снимки отбирались с датами съемки в июле и августе при отсутствии ливневых осадков как минимум за два дня до съемки. Следует отметить, что для арктических районов и в частности для полуострова Ямал характерно

очень небольшое число безоблачных дней в июле и августе, а для некоторых лет вообще полное их отсутствие. Пространственное разрешение снимков спутников Landsat составляет 30 м в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах и 120, 60 и 100 м в тепловом ИК диапазоне в зависимости от номера спутника.

Блок-схема обработки и анализа данных приведена на рис. 2. Предварительная обработка снимков включала их перевод в проекцию UTM (R42), радиометрическую калибровку спектральных каналов радиометров TM (Thematic Mapper), ETM+

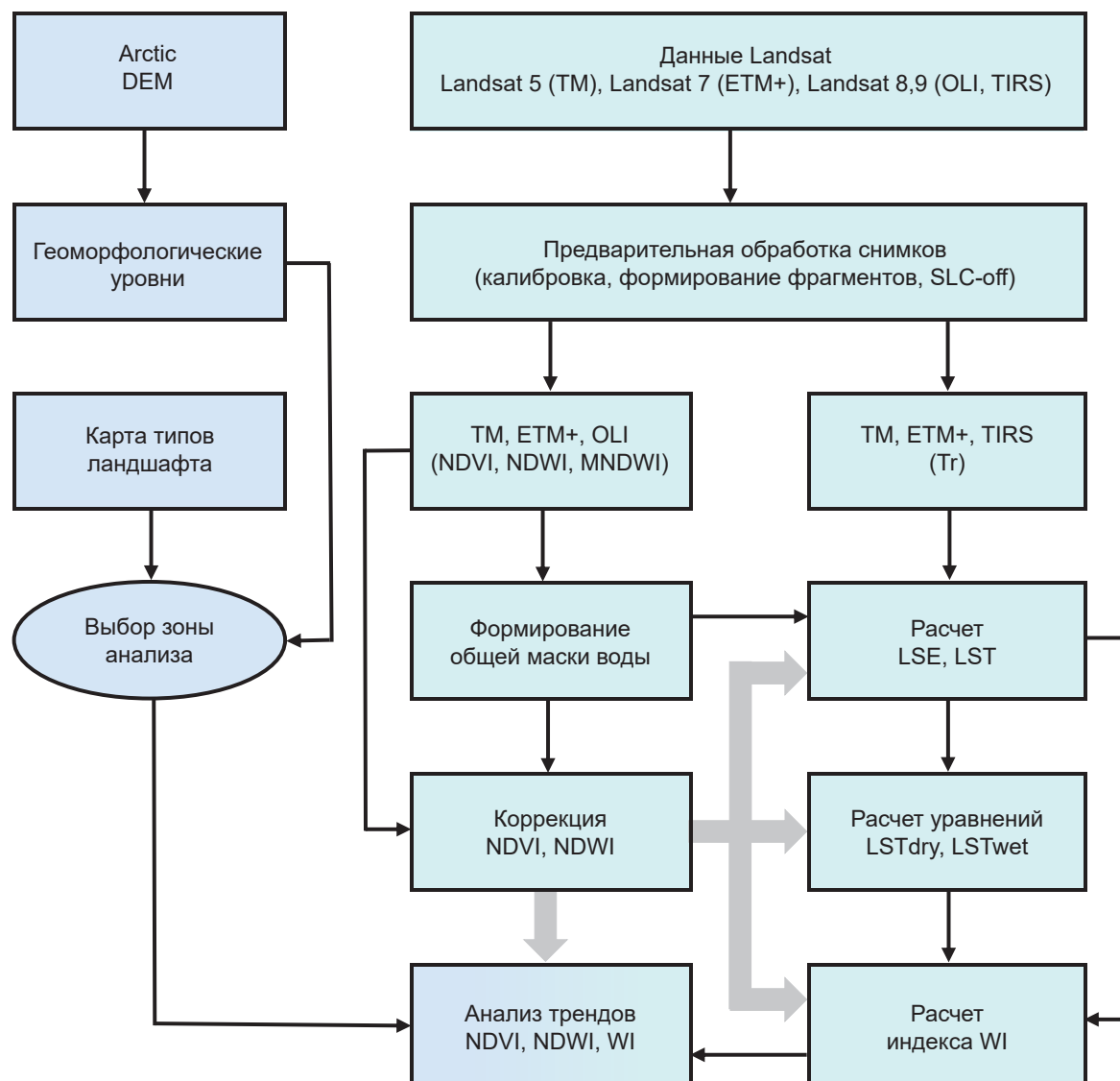


Рис. 2. Блок-схема обработки данных для зонального анализа многолетних трендов изменения индексов
Fig. 2. Flowchart of data processing for zonal analysis of long-term trends in index changes

(Enhanced Thematic Mapper Plus), OLI (Operational Land Imager), TIRS (Thermal Infrared Sensor), а также формирование фрагментов на территории исследований. На этом этапе с использованием алгоритма SLC-off проводилось устранение пробелов в изображении, связанных со сбоями в работе радиометра ETM+ (Landsat 7) после 2003 г. Карта геоморфологических уровней (рис. 1А) формировалась на основе цифровой модели рельефа Arctic DEM (30 м) (<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem>) с перепадами высотных отметок, описанными в [22]. Карта типов ландшафта на этот район приведена в [21].

Для каждого года съемки формировались файлы изображений радиационной температуры поверхности T_r , спектральных индексов NDVI, NDWI, а также модифицированного водного индекса MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) [24] для маскирования водных объектов. На основе ин-

дексов NDVI и радиационной температуры T_r рассчитывались коэффициенты излучения LSE (Land Surface Emissivity) [25] и температура поверхности LST (Land Surface Temperature) [26]. По значениям индекса MNDWI > 0 определялись участки водной поверхности для каждого года съемки, и формировалась общая для всех лет наблюдений маска воды, что необходимо для исключения из анализа всех водных объектов. Участки (пиксели) без растительного покрова со значениями индекса NDVI $< 0,18$ также исключались из анализа.

Известно, что характеристики спектральных каналов радиометров TM, ETM+ и OLI отличаются, что приводит, в частности, к завышению значений индексов NDVI и NDWI, рассчитанных по данным радиометров ETM+ и OLI в сравнении со значениями, вычисленными по данным радиометра TM [27; 28]. В настоящей работе для минимизации этих разли-

Таблица 1. Уравнения регрессии и погрешности коррекции индексов NDVI и NDWI радиометров +ETM и OLI

Table 1. Regression equations and errors in the correction of NDVI and NDWI indices of +ETM and OLI radiometers

Индекс	TM(ETM+)			ETM+(OLI)		
	Уравнение	Δ_0	$\Delta_{\text{корр}}$	Уравнение	Δ_0	$\Delta_{\text{корр}}$
NDVI	$y = 0,918x - 0,003$	0,0373	-0,0009	$y = 1,020x - 0,071$	0,0637	-0,0001
NDWI	$y = 0,919x + 0,003$	0,0383	-0,0013	$y = 0,973x - 0,067$	0,0683	0,0127

чий значения индексов NDVI и NDWI радиометров ETM+ и OLI приводились в соответствие радиометру TM на основе кросс-калибровки (коррекции).

Исходя из предположения, что за один день спектральные характеристики поверхности не изменились, для этой цели аналогично методам, описанным в [27; 28], использовались линейные уравнения (табл. 1), рассчитанные на основе данных двух tandemных пар съемок всей исследуемой территории со спутников Landsat 5 (08.08.2011) и Landsat 7 (07.08.2011), а также Landsat 7 (22.07.2017) и Landsat 8 (23.07.2017) с интервалами в один день. В табл. 1 приведены погрешности (Δ_0 , $\Delta_{\text{корр}}$), характеризующие разности средних значений индексов по данным радиометров ETM+ и TM, а также OLI и ETM+ для всей территории анализа до процедуры коррекции (Δ_0) и после нее ($\Delta_{\text{корр}}$). До коррекции (по Δ_0) отмечаются более высокие средние значения индексов по данным радиометра ETM+ в сравнении с TM, а по данным радиометра OLI выше в сравнении с ETM+. После коррекции эти различия (по $\Delta_{\text{корр}}$) существенно снижаются (минимизируются), что свидетельствует о целесообразности и эффективности проведения кросс-калибровки предложенным способом. Коррекция индексов проводилась в два этапа. На первом этапе значения индексов, рассчитанные по данным радиометра OLI, корректировались по значениям радиометра ETM+, а на втором этапе значения индексов радиометра ETM+ и скорректированные (под ETM+) значения индексов радиометра OLI приводились в соответствие значениям индексов радиометра TM.

На блок-схеме (см. рис. 2) направления использования скорректированных индексов NDVI и NDWI обозначены широкими серыми стрелками. Индексы NDVI, NDWI и MNDWI имеют безразмерные значения в диапазоне от -1 до 1.

Расчет температурно-вегетационного индекса WI для характеристики влажности НРП и почвы в корневой зоне проводился в соответствии с алгоритмом TOTRAM (Thermal-Optical TRAppezoid Models), описанным в [9; 16; 17]. По этой методике для каждого года съемки на основе трапециевидных диаграмм зависимостей LST от NDVI рассчитывались линейные уравнения, характеризующие связь этих параметров для «сухого» (LST_{dry}) и «влажного» (LST_{wet}) краев диаграммы рассеяния [16; 17].

Расчет значений индекса WI для каждого i -го пиксела проводился по формуле

$$WI_i = \frac{LST_{\text{dry}} - LST_i}{LST_{\text{dry}} - LST_{\text{wet}}} = \frac{(a_{\text{dry}} \cdot NDVI_i + b_{\text{dry}}) - LST_i}{(a_{\text{dry}} \cdot NDVI_i + b_{\text{dry}}) - (a_{\text{wet}} \cdot NDVI_i + b_{\text{wet}})}, \quad (1)$$

где a_{dry} , b_{dry} , и a_{wet} , b_{wet} — коэффициенты уравнений регрессии соответственно «сухого» и «влажного» краев диаграммы; LST_i — температура поверхности в наблюдаемом пикселе.

Значения индекса WI меняются от 0 до 1, что соответствует минимальной и максимальной влажности поверхности.

Для определения роли и степени влияния рельефа и типов ландшафта на многолетние тренды индексов NDVI, NDWI и WI выбор участков (зон анализа) проводился в границах каждого из пяти типов ландшафта (типы 9, 3, 8, 2, 6) на каждом геоморфологическом уровне (пойма, I-II террасы, III терраса) (см. рис. 1А, 1В). Поскольку торфяные болота (тип 9) приурочены только к пойме, а остальные типы ландшафта (типы 3, 8, 2, 6) встречаются на I-II и III террасах, всего было сформировано 9 зон анализа. Минимальная площадь зоны анализа составляла 0,063 км² (тип 8, III терраса), максимальная — 1,130 км² (тип 2, I-II террасы).

Границы доверительных интервалов уравнений регрессии и статистическая значимость трендов изменения индексов определялись на основе t -статистики Стьюдента с уровнями порога значимости $\alpha = 0,05$ и $\alpha = 0,01$. Выбор двух уровней порога значимости позволяет выявить степень достоверности тренда для той или иной зоны анализа.

Результаты исследований

Относительно слабые многолетние тенденции изменения состояния НРП и влажности почвы, выявляемые по данным ДЗЗ, могут маскироваться более существенным влиянием других факторов. К их числу относятся различия фенологического и сезонного состояния поверхности, количества выпавших осадков, времени схода паводковых вод, метеорологических условий, а также состояния атмосферы. Учитывая случайный по датам выбор снимков (в

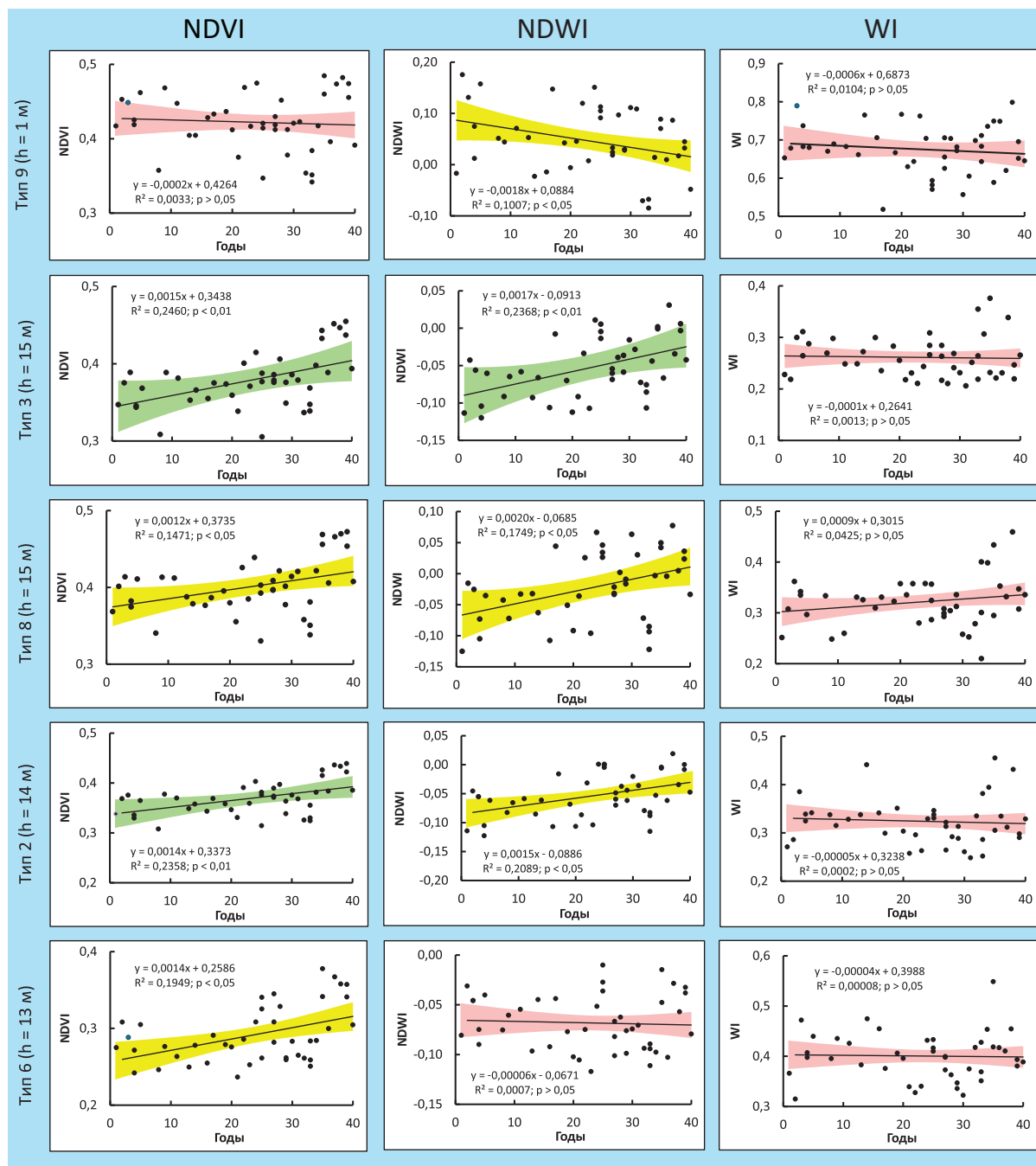


Рис. 3. Многолетние изменения средних значений индексов NDVI, NDWI, WI типов ландшафта в пойме (тип 9) и на I-II террасах (типы 3, 8, 2, 6)

Fig. 3. Long-term changes in mean NDVI, NDWI, and WI values for landscape types in the floodplain (type 9) and on terraces I-II (types 3, 8, 2, 6)

безоблачные дни), во временном ряду анализируемых параметров влияние этих факторов также носит случайный характер, а более высокий разброс значений приводит к снижению значимости трендов.

На рис. 3 для пяти типов ландшафта, расположенных в границах поймы (тип 9) и I-II террас (типы 3, 8, 2, 6) приведены многолетние тренды изменения средних (в границах зоны анализа) значений индексов NDVI, NDWI и WI. Также приведены уравнения

их аппроксимации, коэффициенты детерминации R^2 , границы и пороговые значения доверительной вероятности p , характеризующие значимость трендов. По шкале абсцисс приведены годы космической съемки от начала наблюдений в 1985 г. В скобках даны средние значения высотных отметок зоны анализа. На графиках разными цветами обозначены границы доверительной вероятности трендов с разными уровнями значимости. Красный цвет соответствует

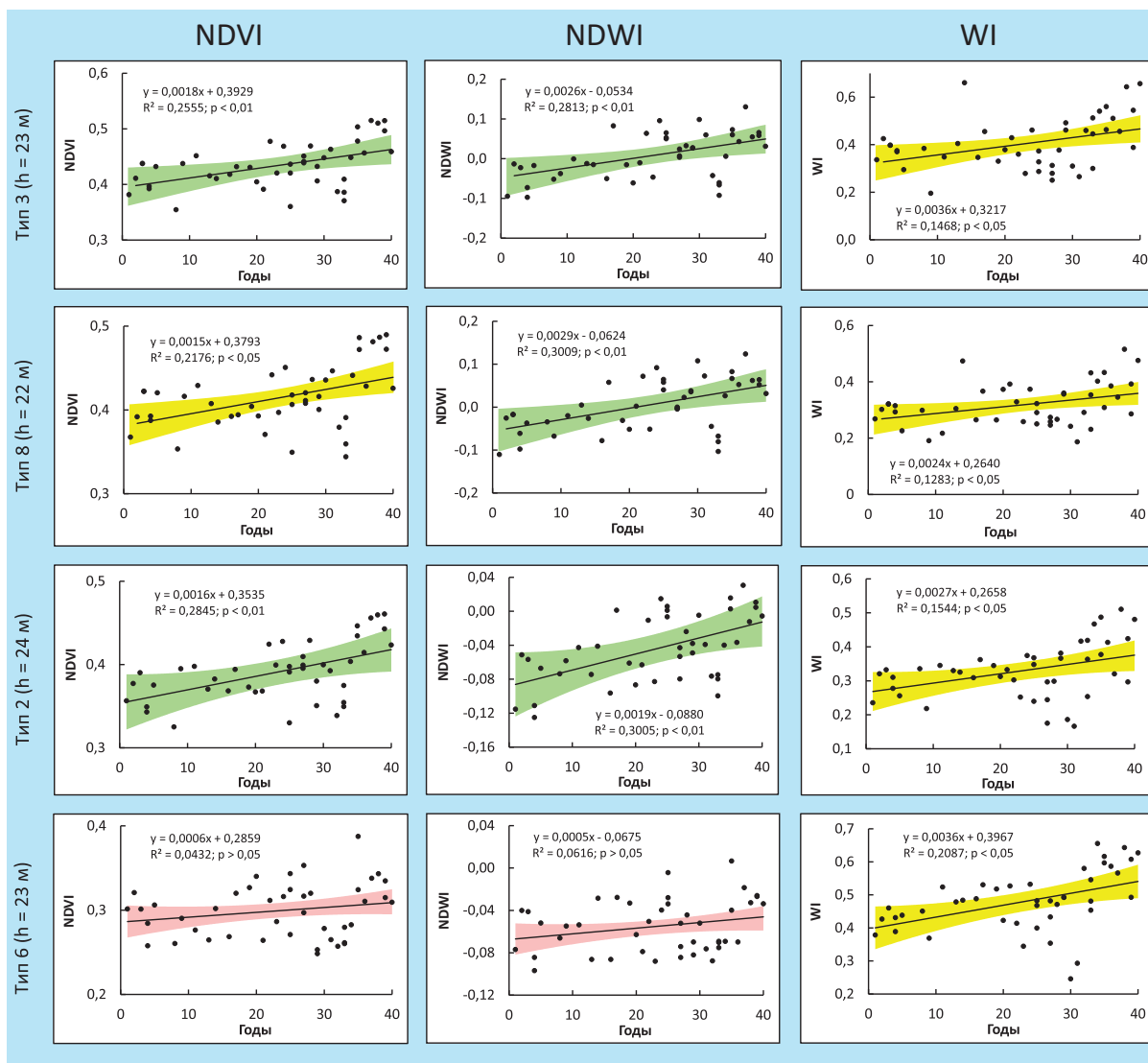


Рис. 4. Многолетние изменения средних значений индексов NDVI, NDWI, WI четырех типов ландшафта (типы 3, 8, 2, 6) на III террасе

Fig. 4. Long-term changes in mean NDVI, NDWI, and WI values for four landscape types (types 3, 8, 2, 6) on terrace III

незначимым ($p > 0,05$) трендам, желтый — значимому уровню ($p < 0,05$), а максимальному уровню значимости ($p < 0,01$) соответствует зеленый цвет.

Направление и темпы изменения индексов характеризуются коэффициентом β при аргументе в уравнении аппроксимации. Следует отметить особенность песчаных раздувов (тип 6), которые только частично покрыты растительностью, что, безусловно, отражается на значениях индексов и трендах их изменения.

Для торфяных болот (тип 9) в пойме (см. рис. 3) отмечается снижение средних значений индексов, причем для NDVI и WI незначимое ($p > 0,05$). В границах I-II террас по индексам NDVI и NDWI отмечается значимый рост по всем типам ландшафта кроме песчаных раздувов (тип 6) по индексу NDWI.

По индексу WI тренды разнонаправленные и незначимые для всех типов ландшафта.

Аналогичные построения для четырех типов ландшафта (3, 8, 2, 6), приуроченных к III террасе (рис. 4), показали общую тенденцию повышения темпов роста индексов (по коэффициенту β), однако для NDVI и NDWI на песчаных раздувах (тип 6) тренды роста незначительные и незначимые.

Следует отметить важность этапа коррекции (кросс-калибровки) индексов NDVI и NDWI, рассчитанных по данным различных радиометров. Как было проверено в настоящей работе, без коррекции наклоны β по индексу NDVI оказываются в 2 раза больше, а по индексу NDWI в 1,5 раза больше, чем значения, приведенные на рис. 3 и 4.

Для корректного сопоставления темпов изменения индексов NDVI, NDWI и WI рассчитывались нор-

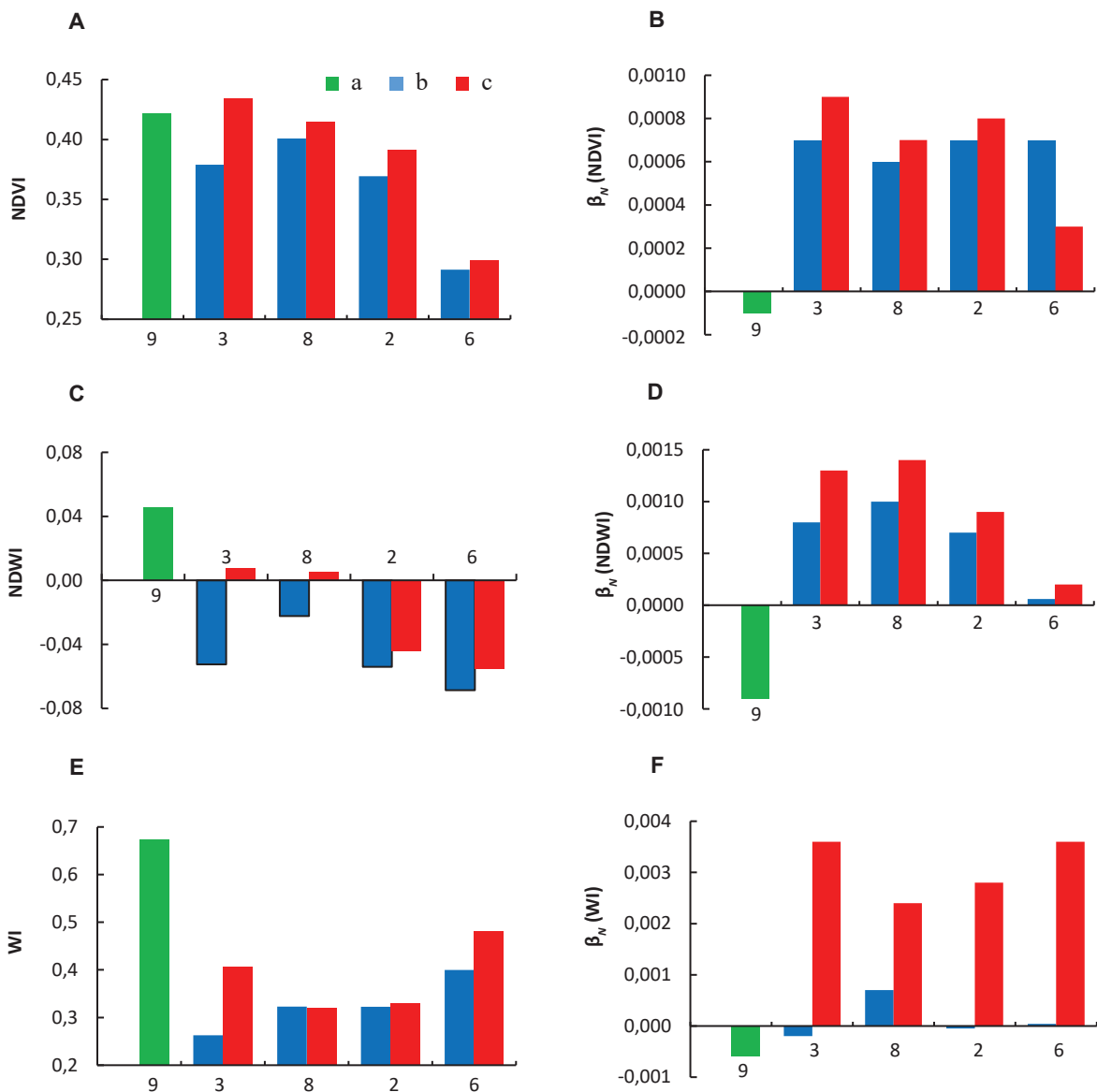


Рис. 5. Диаграммы средних за все годы наблюдений значений индексов NDVI, NDWI, WI (A, C, E) и коэффициентов β_N (NDVI), β_N (NDWI), β_N (WI) (B, D, F) для типов ландшафта 9, 3, 8, 2, 6; а – пойма, б – I-II террасы, с – III терраса
Fig. 5. Diagrams of mean values of NDVI, NDWI, and WI averaged over all observation years (A, C, E) and regression coefficients β_N for NDVI, NDWI, and WI (B, D, F) for landscape types 9, 3, 8, 2, 6; а – floodplain; б – I-II terraces; с – III terrace

мированные на динамический диапазон коэффициенты β_N :

$$\beta_N = \frac{\beta}{N}, \quad (2)$$

где N — диапазон изменения индексов. Для индексов NDVI и NDWI $N = 2$, а для индекса WI $N = 1$.

Очевидно, что изначально свойства НРП и влажность почвы на различных геоморфологических уровнях могут отличаться, поскольку в районах распространения мерзлоты рельеф считается ключевым фактором, определяющим состав и состояние фитоценозов, а также влажность поверхности.

В этой связи для всех зон анализа были построены диаграммы осредненных за все годы наблюдений значений индексов NDVI, NDWI и WI (рис. 5А, 5С, 5Е) и соответствующие им значения коэффициентов β_N (рис. 5В, 5Д, 5F), характеризующие тренды их изменения. На диаграммах по оси абсцисс обозначены номера анализируемых типов ландшафта.

За исключением песчаных раздувов (тип 6) по усредненным значениям индекса NDVI все типы ландшафта на террасах сопоставимы между собой с некоторым превышением значений по ландшафтам, находящимся на III террасе (см. рис. 5А). Аномально низкие значения NDVI на песчаных раздувах (тип 6)

объясняются редкой растительностью и присутствием (в пикселе) открытых песков с низкими ($< 0,18$) значениями NDVI.

По индексам NDWI и WI наиболее существенный контраст наблюдается между торфяными болотами в пойме (тип 9) и остальными типами ландшафта на террасах (см. рис. 5С, 5Е). На ландшафтах III террасы NDWI несколько выше, чем на I-II террасах (см. рис. 5С), что соответствует аналогичным различиям по индексу NDVI (см. рис. 5А). На песчаных раздувах (тип 6) относительно других типов ландшафта на террасах отмечаются более высокие значения индекса WI, что связано с более высокой тепловой инерцией открытого грунта (см. рис. 5Е). По этой причине при близких условиях испарения с поверхности НРП и грунта участки без растительности могут характеризоваться более низкими значениями температуры поверхности и, согласно формуле (1), более высокими значениями индекса WI. Достаточно близкие средние значения WI к наблюдаемым на песчаных раздувах (тип 6) значениям этого индекса ранее отмечались для участков открытых песков на террасах [9].

Для ландшафтов III террасы значения нормированного коэффициента β_N и соответственно темпы роста индекса влажности почвы WI фактически существенно выше, чем у индексов NDVI и NDWI (см. рис. 5В, 5Д, 5F). Наиболее существенные различия многолетних трендов отмечаются между торфяными болотами (тип 9) в пойме и остальными типами ландшафта на террасах. Для торфяных болот в пойме тренды всех индексов отрицательные, на террасах тренды NDVI и NDWI положительные (см. рис. 5В, 5Д). По индексу влажности почвы WI на I-II террасах тренды близки к нулю, а на III террасе имеют аномально высокие положительные значения коэффициента β_N (см. рис. 5F).

Обсуждение результатов

За исключением торфяных болот в пойме и песчаных раздувов на III террасе по остальным типам ландшафта в районе Марресалья на всех террасах за последние 40 лет отмечаются значимые тренды повышения индекса NDVI с темпами роста 0,0012—0,0018 единиц в год, что составляет около 0,3% в год (см. рис. 3 и 4). Данный факт соответствует сделанным ранее выводам о «позеленении» растительности в тундре в результате изменения климата [6; 10; 29]. Диаграммы на рис. 5В, 5Д и 5F показывают, что на более низких I-II террасах между изменением НРП и влажности почвы нет очевидной связи. Здесь темпы роста НРП (по NDVI и NDWI) не связаны с изменением влажности почвы (по WI) и, скорее всего, обусловлены только повышением температуры воздуха. В то же время при тех же климатических изменениях на III террасе на всех типах ландшафта за исключением песчаных раздувов (тип 6) отмечаются более высокие, чем на I-II террасах, темпы роста НРП (по NDVI) (см. рис. 5В), что, скорее всего, свя-

зано с повышением влажности почвы на III террасе (см. рис. 5F). Таким образом, можно предположить, что увеличение влажности почвы на III террасе выступает как дополнительный фактор повышения темпов роста НРП.

За исключением песчаных раздувов (тип 6) различия коэффициентов β_N между типами ландшафта в основном меньше, чем различия между коэффициентами β_N для каждого типа ландшафта, расположенного на разных террасах. Особенно явно это проявляется по трендам индекса WI (см. рис. 5F). Отсюда можно предположить, что типы ландшафта не столь существенно влияют на темпы и направленность изменений НРП и влажности почвы по сравнению с влиянием особенностей рельефа.

Особый интерес представляют тренды индексов на песчаных раздувах (тип 6) III террасы (см. рис. 5В, 5Д, 5F). Повышение NDVI и NDWI здесь незначительно и незначимо (см. рис. 4), что объясняется влиянием доли (в пикселе) открытых грунтов. В то же время здесь отмечаются предельно высокие и значимые темпы роста индекса WI, соизмеримые с его темпами роста на других ландшафтах III террасы (см. рис. 4, рис. 5F). Этот факт невозможно объяснить более высокой активностью роста НРП, поскольку темпы роста индексов NDVI и NDWI на песчаных раздувах III террасы незначимы и в разы ниже, чем на других ландшафтах этой террасы (см. рис. 5В, 5Д). Поэтому можно предположить, что оттаивание грунтов верхнего горизонта при потеплении климата приводит к повышению влажности почвы независимо от растительного покрова, т. е. в том числе на участках без растительности.

В данном примере многолетнее повышение влажности почвы (по WI) на ландшафтах III террасы (см. рис. 5F) также не может объясняться увеличением количества атмосферных осадков, поскольку на соседних участках I-II террас и в пойме не наблюдается рост индекса WI. Столь существенная разница в направленности и темпах изменения индекса влажности почвы WI в пойме, на I-II и III террасах, в том числе для одних и тех же типов ландшафта, может быть связана с различиями их геоэкологических условий.

Очевидно, что достоверность выявления связей между геоэкологическими условиями и свойствами поверхности в существенной степени зависит от достоверности исходных данных, в том числе от точности классификации, картографирования, геоэкологической и гидрологической характеристик типов ландшафта. Согласно описаниям [21; 23] пяти типов ландшафта в районе Марресалья, к наиболее влажным из них относятся торфяные болота (тип 9), полигональная тундра (тип 3) и торфяники (тип 8). Дренированная тундра (тип 2) и песчаные раздувы (тип 6) отнесены к наиболее сухим ландшафтам. По данным спутников Landsat наиболее контрастно и однозначно различия в степени дренирования и свойств НРП проявляются между торфяными боло-

тами (тип 9) и песчаными раздувами (тип 6). Первые характеризуются аномально высокими средними значениями NDVI, NDWI и WI, а вторые — аномально низкими средними значениями NDVI, NDWI и низкими значениями индекса WI (с учетом тепловой инерции открытого грунта) (см. рис. 5A, 5C, 5E). В этой связи для сопоставления характеристик и динамики геокриологических условий с многолетними трендами индексов NDVI, NDWI и WI более детально анализировались эти два типа (типы 9, 6) ландшафта.

Известно, что в тундре льдистость грунтов сезонно-мерзлого слоя и глубина их оттаивания зависят от мезо- и микрорельефа, который определяет условия накопления влаги и температурный режим. В районе Марресалья болотные ландшафты в низкой пойме характеризуются относительно высокой влажностью грунтов и незначительным изменением глубины СТС, что объясняется проседанием поверхности при оттаивании, а также увеличением высоты мохового покрова [23]. Дренажные ландшафты в районе Марресалья, как правило, приурочены к более высоким элементам рельефа, характеризуются относительно низкой влажностью грунтов и существенным увеличением глубины СТС [23].

Сопоставление многолетних тенденций изменения геокриологических условий в районе Марресалья с тенденциями изменения индекса WI свидетельствует о принципиальной возможности его использования в качестве индикатора изменения глубины СТС для подобных типов криогенного ландшафта. Так, на торфяных болотах в пойме (тип 9) тренды индекса WI отрицательные, незначительные и незначимые (см. рис. 3, рис. 5F). В то же время на III террасе на дренажных песчаных раздувах (тип 6) отмечается предельно высокий и значимый тренд роста индекса WI (см. рис. 4, рис. 5F). Предполагается, что ландшафты I-II террас по глубине СТС занимают промежуточное положение между ландшафтами поймы и III террасы, что в определенной мере соответствует наблюдаемым промежуточным значениям коэффициентов β_N индекса WI (см. рис. 5F), однако ближе к состоянию торфяных болот в пойме. Таким образом, высокие темпы роста индекса влажности почвы WI характерны для дренажных ландшафтов с существенным увеличением глубины СТС, а низкие темпы роста, незначимые или отрицательные тренды WI — для переувлажненных ландшафтов с незначительным изменением глубины СТС.

Рост влажности почвы при деградации мерзлых грунтов и увеличении глубины СТС ранее уже отмечался в [5; 30]. В данном исследовании впервые рассматривается возможность изучения подобных процессов на основе индекса WI, рассчитанного по данным спутников Landsat, что существенно расширяет спектр решаемых задач мониторинга и картографического моделирования состояния криогенных ландшафтов тундровой зоны.

Длительное влияние потепления климата, сопровождающееся повышением влажности почвы,

может быть сравнимо с процессами локального изменения геокриологических условий при одномоментном нарушении НРП, например, при прохождении вездеходного транспорта или после пожаров [31]. При нарушении НРП так же, как и при потеплении климата, увеличивается количество тепловой энергии, поступающей в активный слой, что в обоих случаях может привести к деградации мерзлоты, увеличению глубины СТС и повышению влажности поверхности.

Существование связи между рельефом, свойствами растительности, влажностью поверхности и глубиной СТС достаточно хорошо известно [5; 6; 30]. Ранее также делался вывод о положительной связи между тенденциями повышения индекса NDVI и увеличением глубины СТС как следствия изменения климата [6—8; 11; 32]. Обобщение полученных результатов и опыта предыдущих исследований позволяет уточнить причинно-следственные связи между изменением геокриологических условий, свойств НРП и влажности почвы. Оттаивание мерзлоты на ландшафтах с относительно низкой льдистостью грунтов верхнего горизонта приводит к существенному увеличению глубины СТС, повышению влажности почвы и, как следствие, более активному росту растительности за счет поступления дополнительного объема влаги. Косвенно об этом также свидетельствуют более высокие темпы роста (по коэффициенту β_N) индекса WI на III террасе в сравнении с NDVI и NDWI (см. рис. 5B, 5D, 5F). На таких участках тренды роста индексов NDVI и NDWI могут рассматриваться как дополнительные индикаторы увеличения глубины СТС, но только в случае значимого повышения влажности почвы, в том числе определяемого по индексу WI.

Предлагаемый подход имеет определенные ограничения для применения в районах тундры. Как показывает опыт, подобные исследования могут проводиться на относительно небольших территориях, что обусловлено двумя причинами. Первая связана с чрезвычайно малым количеством безоблачных дней в летний период. Уменьшение размеров территории позволяет увеличить число космических снимков с фрагментами без облачности и получить более представительную выборку данных. Вторая причина связана с влиянием неоднородных по пространству случайных колебаний температуры воздуха, что, в частности, влияет на достоверность распределения индекса WI. Очевидно, что уменьшение размеров территории исследований снижает влияние этого фактора. Также следует отметить, что применение метода возможно для территорий, близких к анализируемому району Марресалья по строению, типам ландшафта, типам растительности, геоморфологическим и геокриологическим условиям.

Заключение

На примере участка тундры в районе полярной станции Марресалья на полуострове Ямал по данным

со спутников Landsat охарактеризованы связанные с потеплением климата тенденции изменения растительности и влажности почвы разных типов ландшафта, находящихся на разных геоморфологических уровнях, а также связь этих изменений с изменением глубины СТС. Анализ проводился с использованием вегетационного индекса NDVI, индекса влажности поверхности NDWI, а также температурно-вегетационного индекса WI, характеризующего влажность почвы в корневой зоне растительного покрова. Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Обусловленные потеплением климата наиболее высокие темпы роста НРП и влажности почвы (по индексам NDVI, NDWI и WI) для всех типов ландшафта отмечаются на более высоком геоморфологическом уровне — III террасе.

2. В сравнении с высотой рельефа тип ландшафта не оказывает сопоставимого с ним влияния на изменение состояния НРП и влажности почвы (по индексам NDVI, NDWI и WI).

3. Высокий и значимый темп роста индекса WI на песчаных раздувах III террасы может свидетельствовать о первичности процесса повышения влажности почвы в результате оттаивания грунтов и связанного с ним усиления роста растительности.

4. Существенные различия в темпах роста индекса WI одних и тех же типов ландшафта, расположенных на разных геоморфологических уровнях, могут быть обусловлены различиями геокриологических условий. Высокие и значимые тренды повышения индекса WI характерны для дренированных ландшафтов с относительно низкой влажностью грунтов и более высокими темпами увеличения глубины СТС. Незначительные и незначимые тренды изменения WI характерны для ландшафтов поймы с относительно высокой влажностью грунтов и незначительным изменением глубины СТС.

5. Для территорий, аналогичных району Марресалья и имеющих схожий диапазон влажности грунтов верхнего горизонта, многолетние тренды изменения индекса влажности почвы WI могут рассматриваться в качестве индикатора изменения глубины СТС.

6. Многолетние тренды индексов NDVI и NDWI могут рассматриваться в качестве дополнительных индикаторов изменения глубины СТС, но только в случаях соответствия трендам индекса WI.

В районах строительства и функционирования объектов нефтегазового комплекса предлагаемый метод анализа может быть использован для выявления участков наиболее интенсивного повышения влажности поверхности и увеличения глубины СТС, связанного с потеплением климата. Определенный интерес могут представлять результаты аналогичных исследований в районах взрывов бугров газодинамического пучения на полуострове Ямал [33; 34]. Анализ и обобщение существующих моделей подобной взрывной дегазации показали, что наиболее вероятны те из них, в которых предполагаются

генерация и накопление природного газа под вечной мерзлотой, а потепление климата вызывает локальное истончение и ослабление перекрывающих льдистых пород [35].

В то же время очевидна необходимость проведения дополнительных исследований, касающихся уточнения связи индексов NDVI, NDWI и WI с влажностью и типом почвы, глубиной СТС, составом и льдистостью грунтов, особенностями мезо- и микрорельефа, объемами фитомассы и видами растительного покрова. Рассматриваемый в настоящей работе анализ данных ДЗЗ с зональным делением территории по типам ландшафта и геоморфологическим уровням позволяет более точно характеризовать различия в реакции поверхности криолитозоны на изменение климата, что ранее практически не проводилось при локальных и региональных исследованиях. В целом полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения индексов NDVI, NDWI и WI для мониторинга арктической растительности и вечной мерзлоты и могут послужить основой для проведения аналогичных наблюдений за состоянием и трансформациями криогенных ландшафтов в других районах тундровой зоны.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения ресурсов углеводородов шельфа и сопредельной суши арктических и суб арктических регионов России в условиях меняющегося климата» № 125020501403-7.

Литература/References

1. Beamish A., Raynolds M. K., Epstein H., Frost G. V., Macander M. J., Bergstedt H., Bartsch A., Kruse S., Miles V., Tanis C. M., Heim B., Fuchs M., Chabrilat S., Shevtsova I., Verdonen M., Wagner J. Recent trends and remaining challenges for optical remote sensing of Arctic tundra vegetation: A review and outlook. *Remote Sensing of Environment*, 2020, vol. 246, no. 1, p. 111872. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111872>.
2. Clayton L. K., Schaefer K., Battaglia M. J., Bourgeau-Chavez L., Chen J., Chen R. H., Chen A., Bakian-Dogheh K., Grelik S., Jafarov E., Liu L., Michaelides R. J., Moghaddam M., Parsekian A. D., Rocha A. V., Schaefer S. R., Sullivan T., Tabatabaenejad A., Wang K., Wilson C. J., Zebker H. A., Zhang T., Zhao Y. Active layer thickness as a function of soil water content. *Environ. Res. Lett.*, 2021, vol. 16, p. 055028. Available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfa4c>.
3. Khani H. M., Kinnard C., Gascoin S., Levesque E. Fine-scale environment control on ground surface temperature and thaw depth in a High Arctic tundra landscape. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2023, vol. 34, no. 4, pp. 467—480. Available at: <https://doi.org/10.1002/ppp.2203>.
4. Heijmans M. M. P. D., Magnusson R. I., Lara M. J., Frost G. V., Myers-Smith I. H., van Huissteden J., Jorgen-

- son M. T., Fedorov A. N., Epstein H. E., Lawrence D. M., Limpens J. Tundra vegetation change and impacts on permafrost. *Nature Reviews Earth & Environ.*, 2022, vol. 3, no. 1, pp. 68—84. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00233-0>.
5. Park H., Walsh J., Fedorov A. N., Sherstiukov A. B., Iijima Y., Ohata T. The influence of climate and hydrological variables on opposite anomaly in active-layer thickness between Eurasian and North American watersheds. *The Cryosphere*, 2013, vol. 7, pp. 631—645. Available at: <https://doi.org/10.5194/tc-7-631-2013>.
6. Liu Y., Wu X., Wu T., Hu G., Zou D., Qiao Y., Wei X., Fan X., Yan X. Climate warming controls vegetation growth with increasing importance of permafrost degradation in the Northern hemisphere during 1982—2022. *Remote Sensing*, 2025, vol. 17, no. 1, p. 104. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs17010104>.
7. Vasiliev A. A., Drozdov D. S., Gravis A. G., Malkova G. V., Nyland K. E., Streletskiy D. A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 15, p. 045001. Available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6f12>.
8. Yang Y., Wang X., Wang T. Permafrost degradation induces the abrupt changes of vegetation NDVI in the Northern Hemisphere. *Earth's Future*, 2024, vol. 12, p. e2023EF0004309. Available at: <https://doi.org/10.1029/2023EF0004309>.
9. Корниенко С. Г., Елсаков В. В. Оценка информативности температурно-вегетационного индекса как индикатора влажности напочвенного растительного покрова тундровой зоны // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. — 2024. — Т. 21, № 3. — С. 155—170. — URL: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-3-155-170>.
10. Kornienko S. G., Elsakov V. V. Assessment of informativeness of temperature-vegetation index as an indicator of moisture content of tundra ground vegetation cover. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2024, vol. 21, no. 3, pp. 155—170. Available at: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-3-155-170>. (In Russian).
11. Liu C., Huang H., Sun F. A pixel-based vegetation greenness trend analysis over the Russian tundra with all available Landsat data from 1984 to 2018. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 23, p. 4933. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs13234933>.
12. Pastick N. J., Jorgenson M. T., Wylie B. K., Nield S. J., Johnson K. D., Finley A. O. Distribution of near-surface permafrost in Alaska: Estimates of present and future conditions. *Remote Sensing of Environment*, 2015, vol. 168, pp. 301—315. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.019>.
13. Wenzl M., Baumhoer C. A., Dietz A. J., Kuenzer C. Vegetation changes in the Arctic: A review of earth observation applications. *Remote Sensing*, 2024, vol. 16, no. 23, p. 4509. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs16234509>.
14. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, vol. 8, pp. 127—150. Available at: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
15. Bocai Gao. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, vol. 58, no. 3, pp. 257—266. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
16. Giese L., Baumberger M., Ludwig M., Schneidereit H., Sánchez E., Robroek B. J. M., Lamentowicz M., Lehmann J. R. K., Hölzel N., Knorr K.-H., Meyer H. Recent trends in moisture conditions across European peatlands. *Remote Sens. Appl.: Society and Environ.*, 2025, vol. 37, p. 101385. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101385>.
17. Sandholt I., Rasmussen K., Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 79, pp. 213—224. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7).
18. Burdun I., Bechtold M., Sagris V., Komisarenko V., De Lannoy G., Mander Ü. A comparison of three trapezoid models using optical and thermal satellite imagery for water table depth monitoring in Estonian bogs. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 12, p. 1980. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs12121980>.
19. Sadeghi M., Babaeian E., Tuller M., Jones S. B. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. *Remote Sensing of Environment*, 2017, vol. 198, pp. 52—68. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.041>.
20. 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, vol. 238, pp. 350—357. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.959165>.
21. Kornienko S. G. Variations in thermal diffusivity of the tundra cover according to data from field observations during the summer period. *Earth's Cryosphere*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 9—18.
22. Oblogov G. E., Vasiliev A. A., Streletskaya I. D., Zadorozhnaya N. A., Kuznetsova A. O., Kanevskiy M. Z., Semenov P. B. Methane content and emission in the permafrost landscapes of western Yamal, Russian Arctic. *Geosciences*, 2020, vol. 10, no. 10, p. 412. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences10100412>.
23. Дубровин В. А., Крицук Л. Н. Результаты изучения температурного режима мерзлой толщи района Марре-Сале на полуострове Ямал // *Инженер. геология*. — 2010. — № 3. — С. 68—74. — URL: <https://elibrary.ru/ncxixp>.
24. Dubrovina V. A., Kritsuk L. N. The research results of the frozen rock mass temperature regime in the Marre-Sale region on the Yamal peninsula. *Engineering Geology*, 2010, no. 3, pp. 68—74. Available at: <https://elibrary.ru/ncxixp>. (In Russian).
25. Васильев А. А., Облогов Г. Е., Широков Р. С. Долговременный мониторинг глубины сезонного

- протаивания пород в типичных тундрах западно-го Ямала // Криосфера Земли. — 2023. — Т. 27, № 4. — С. 3—13. — URL: <https://doi.org/10.15372/KZ20230401>.
- Vasiliev A. A., Oblogov G. E., Shirokov R. S. Long-term monitoring of the active layer thickness in typical tundras of the western Yamal. *Earth's Cryosphere*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 3—11. Available at: <https://doi.org/10.15372/KZ20230401>. (In Russian).
24. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Intern. J. of Remote Sensing*, 2006, vol. 27, no. 14, pp. 3025—3033. Available at: <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.
25. Van de Griend A. A., Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized different vegetation index for natural surfaces. *Intern. J. of Remote Sensing*, 1993, vol. 14, no. 6, pp. 1119—1131. Available at: <https://doi.org/10.1080/01431169308904400>.
26. Artis D. A., Carnahan W. H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 1982, vol. 12, no. 4, pp. 313—329. Available at: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(82)90043-8).
27. Teillet P. M., Barker J. I., 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, vol. 78, no. 1—2, pp. 39—54. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00248-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00248-6).
28. Holden C. E., Woodcock C. E. An analysis of Landsat 7 and Landsat 8 under flight data and the implications for time series investigations. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 185, pp. 16—36. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.052>.
29. Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А. и др. «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 2 (30). — С. 31—44. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44.
- Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Vaisfeld M. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Tertytsky G. M. “The greening” of the tundra as a driver of the modern dynamics of arctic biota. *Arctic: Ecology and Economy*, 2018, no. 2 (30), pp. 31—44. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44. (In Russian).
30. Iijima Y., Fedorov A. N., Park H., Suzuki K., Yabuki H., Maximov T. C., Ohata T. Abrupt increases in soil temperatures following increased precipitation in a permafrost region, central Lena River basin, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, vol. 21, pp. 30—41. Available at: <https://doi.org/10.1002/ppp.662>.
31. Тишков А. А., Титова С. В. Пожары в Арктической зоне Российской Федерации: новые оценки, роль изменений климата и возможные последствия // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 1. — С. 98—108. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-1-98-108.
- Tishkov A. A., Titova S. V. Fires in the Arctic zone of the Russian Federation: new assessments, the role of climate change and possible consequences. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 1, pp. 98—108. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-1-98-108. (In Russian).
32. Jin X-Y., Jin H-J., Iwahana G., Marchenko S. S., Luo D-L., Li X-Y., Liang S-H. Impacts of climate-induced permafrost degradation on vegetation: A review. *Advances in Climate Change Research*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 29—47. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.07.002>.
33. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Мониторинг развития Дуплетного объекта взрыва газа С22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 320—333. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-320-333.
- Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Development monitoring of the C22 gas blowout Doublet object on Yamal peninsula using remote sensing data. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 320—333. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-320-333. (In Russian).
34. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А., Гаврилов А. А. Аномально быстрый рост и взрыв Ямальского бугра газодинамического пучения С23 в 2020—2024 годах // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 4—17. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-4-17.
- Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Gavrilov A. A. Anomalous rapid growth and explosion of the C23 Yamal gas-dynamic heaving mound in 2020—2024. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 4—17. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-4-17. (In Russian).
35. Hellevang H., Ippach M. R., Westermann S., Nooraiepour M. Formation of giant Siberian gas emission craters (GECs). *Science of The Total Environment*, 2025, vol. 995, p. 180042. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180042>.

Информация об авторе

Корниенко Сергей Гельевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией аэрокосмических методов геоэкологического мониторинга нефтегазоносных областей криолитозоны, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: spaceakm2@ogri.ru.

ZONAL PATTERNS OF CHANGE IN VEGETATION COVER AND SOIL MOISTURE IN TYPICAL TUNDRA UNDER CLIMATE WARMING CONDITIONS (A CASE STUDY OF THE MARRESAL AREA, YAMAL PENINSULA)

Kornienko, S. G.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on February 2, 2026

For citing

Kornienko S. G. Zonal Patterns of Change in Vegetation Cover and Soil Moisture in Typical Tundra under Climate Warming Conditions (A Case Study of the Marresal Area, Yamal Peninsula). *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 3, pp. 347—360. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-347-360. (In Russian).

Abstract

Under climate warming, the intensity of permafrost transformation process depends on many factors, including topography, landscape types, vegetation cover, and soil composition and moisture. Therefore, the author considers it relevant to identify the factors that most significantly influence permafrost stability, as well as to determine surface properties (indicators) that characterize its degradation. The aim of the study is to assess how climate warming alters vegetation properties and soil moisture across different landscape types and geomorphological levels, and to evaluate the relationship between these changes and geocryological conditions. The analysis is based on Landsat satellite data acquired between 1985 and 2024 for an area of typical tundra on the western coast of the Yamal Peninsula. Vegetation and moisture dynamics were quantified using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), the Normalized Difference Water Index (NDWI), and the temperature-vegetation soil moisture index (WI, Wet Index). The identified trends in the indices show a dominant influence of topography on the rate of soil moisture and vegetation cover growth. Thus, the change rates of indices can be considered as indicators of changes in the depth of the seasonal thaw layer.

Keywords: *soil moisture, climate change, geocryological conditions, geomorphological levels, vegetation cover, landscape types, trend analysis, tundra, Landsat.*

Funding

This work was carried out within the framework of the state assignment “Improving the efficiency and environmental safety of hydrocarbon resource development on the shelf and adjacent land in the Arctic and subarctic regions of Russia in a changing climate” no. 125020501403-7.

Information about the authors

Kornienko, Sergey Gelievich, PhD of Engineering, Head of the Laboratory of Aerospace Methods of Geoecological Monitoring of Oil and Gas Bearing Areas of the Cryolithozone, Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: spaceakm2@ogri.ru.

© Kornienko S. G., 2026