

УДК 551.345, 58.009, 58.056, 581.9.

ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ИНДЕКС NDVI КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ДИНАМИКИ МЕРЗЛОТНЫХ ПРОЦЕССОВ И ТЕХНОГЕНЕЗА НА ЧУКОТСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

М.Ю. Грищенко¹, А.А. Маслаков², А.Г. Григорян³, И.А. Алдошин⁴

^{1–4} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹ Кафедра картографии и геоинформатики

² Научно-исследовательская лаборатория геоэкологии Севера

³ Кафедра биогеографии

⁴ Кафедра физической географии и ландшафтования

¹ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: m.gri@geogr.msu.ru

² Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru

³ Магистрант; e-mail: 21270iv@gmail.com

⁴ Магистрант; e-mail: aldoshin.ilia@yandex.ru

Современные климатические изменения, происходящие в Арктике, оказывают существенное влияние на мерзлотные условия региона, которые, в свою очередь, определяют условия произрастания напочвенных покровов. Данная работа посвящена выявлению пространственных закономерностей условий произрастания тундровой растительности, рельефа, поверхностных отложений и мерзлотных условий для ключевого участка в пределах Чукотского полуострова. Результаты маршрутных наблюдений, подкрепленные анализом долгосрочных трендов изменения вегетационного индекса NDVI и сопоставленные с ранее опубликованными данными многолетнего мониторинга сезонно талого слоя (СТС) и проектного покрытия растительности, позволили выявить картину современной эволюции растительного покрова в результате изменений климата и техногенного воздействия. Получен ряд растительных сообществ, отражающий спектр значений NDVI в пределах района исследований. Выявлено небольшое (до 0,3 за 20 лет), но устойчивое повышение значений NDVI, характерное для всей территории ключевого участка. Показано, что на равнинных участках повышение интенсивности вегетации за последние 20 лет характерно в целом для отрицательных форм рельефа, образованных как вследствие естественной деградации многолетней мерзлоты, так и при антропогенном воздействии. Последнее в долгосрочной перспективе является фактором увеличения биопродуктивности, поскольку увеличивает шероховатость дневной поверхности. Полученные результаты показывают, что в условиях потепления климата Арктики динамика мерзлотных условий в криолитозоне является ведущим фактором, определяющим изменение условий произрастания тундровой растительности Чукотского полуострова.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, растительный покров, сезонно талый слой, тундра, изменение климата

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.8

ВВЕДЕНИЕ

Современные климатические изменения, наблюдавшиеся повсеместно, наиболее ярко выражены в высоких широтах Северного полушария [Rantanen et al., 2022], где широко распространены термодинамически нестабильные многолетнемерзлые породы (ММП). Они чутко реагируют на изменения теплового баланса поверхности, что проявляется, в первую очередь, в температурном отклике [Biskaborn et al., 2019]. Помимо роста температуры пород, реакция криолитозоны на климатические изменения проявляется в увеличении глубины сезонного оттаивания почвы [Kaverin et al., 2021; Nyland et al., 2021], понижении кровли мерзлоты [Vasiliev et al., 2020], просадках дневной поверхности [Streletsckiy

et al., 2024] и активизации процессов термокарста и термоэррозии [Kokelj, Jorgenson, 2013].

Наблюдаемые изменения мерзлотных условий Арктики и Субарктики имеют комплексные последствия для природной среды. Особое внимание в исследованиях последних лет уделяется реакции растительных сообществ на мерзлотно-климатические изменения [Heijmans et al., 2022], поскольку растительность криолитозоны является одновременно чутким индикатором изменения природных условий и фактором, определяющим условия теплообмена атмосферы и подстилающих пород [Тыртыков, 1969]. Отмечается [Guo et al., 2018], что напочвенные покровы (растительность и органогенный слой почвы) являются не менее мощным регулято-

ром мерзлотных условий, чем изменения климата. Определение реакции растительности на меняющиеся мерзлотно-климатические условия проводится путем организации стационарных [Москаленко и др., 2014] и дистанционных мониторинговых наблюдений, а также при помощи численного моделирования [Жильцова, Анисимов, 2013].

Наиболее популярным исследованием является оценка динамики спектральных индексов (NDVI, LAI и др.), характеризующих состояние растительного покрова [Frost et al., 2020]. Внутрисезонная и межгодовая динамика NDVI позволяет давать как региональные, так и глобальные оценки изменения растительного покрова высоких широт на фоне климатических вариаций. Разность индекса NDVI за разные годы использовалась для выявления активности экзогенных процессов в криолитозоне, например криогенных оползней [Rudy et al., 2013]. Индекс NDVI косвенно свидетельствует о повышении глубины сезонного оттаивания почвы [Yang et al., 2024].

Влияние глобального изменения климата на растительный покров и его характеристики имеет региональный характер. Оно зависит от специфики климатических изменений, существенно отличающихся, в том числе в пределах территории России [Valentini et al., 2020]. При этом покрытие криолитозоны геоботаническими исследованиями крайне неравномерно: даже при интенсивном использовании данных дистанционного зондирования Земли, обширные пространства Центральной и Северо-Восточной Сибири изучены гораздо хуже, чем Северная Европа или запад Северной Америки [Heijmans et al., 2022].

В данной работе внимание сфокусировано на территории приморских равнин Чукотского полуострова – одном из самых труднодоступных районов нашей страны. Долгосрочные стационарные исследования в регионе выявили устойчивый тренд повышения температуры приземного воздуха за последние 50 лет [Maslakov et al., 2020], который привел к росту глубины сезонного оттаивания почвы в регионе [Abramov et al., 2021] и активизации экзогенных процессов. Двадцатилетние геоботанические исследования в пределах отдельных мониторинговых площадок зафиксировали смену растительных ассоциаций на фоне изменившихся мерзлотных условий и общего роста биопродуктивности растительного покрова [Maslakov et al., 2024]. Цель данной работы – выявить связь между характером изменений мерзлотных условий и растительным покровом приморских равнин Восточной Чукотки по данным дистанционного зондирования. В основе исследования лежат материалы полевых маршрутных наблюдений и анализ долгосрочных изменений индекса NDVI.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследований. Полигон «Приморские равнины Восточной Чукотки» площадью 210 км² расположен на восточном побережье Чукотского полуострова. Территория представляет собой слаженное низкогорье мезозойской складчатости с отметками до 900 м абсолютной высоты, окруженное узкой полосой приморских равнин. В результате морских трансгрессий и оледенений в плейстоцене равнинные участки в пределах полигона имеют разный генезис. В западной части полигона представлен долинный комплекс реки Лорэн – пойма и первая надпойменная терраса. В центральной части полоса приморских равнин представлена четвертой и третьей ледниково-морскими террасами, расчлененными долинным комплексом р. Чульхевеем (Аккани). В восточной части полигона (окрестности с. Лаврентия) расположена водно-ледниковая увалистая равнина [Maslakov et al., 2021]. В пределах полигона встречаются повторно-жильные и пластовые льды. Последние вскрываются в береговых обрывах и термоцирках на морском побережье [Кузякин и др., 2024]. Климат территории субарктический морской, с длинной и умеренно холодной зимой и коротким прохладным летом [Maslakov et al., 2024]. Палеоклиматические условия сформировали здесь ММП сплошного распространения мощностью в горных массивах до 600 м, а в пределах приморских равнин – 100–200 м [Афанасенко и др., 1989].

Территория исследования относится к зоне типичных тундр. На равнинах преобладают травяно-кустарничковые кочкарные тундры, в ложбинах и долинах рек нередко встречаются заросли карликовой ивы – ерник. На склонах в предгорьях до отметок 100–200 м распространены горные злаково-моховые и лишайниковые тундры, а выше 200 м – гольцы с куртинами злаковых тундр.

Отбор космических снимков. В качестве важнейшей характеристики растительного покрова в настоящей работе использован нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI. Для поиска наиболее репрезентативных снимков, охватывающих исследуемый участок, необходимо в первую очередь определить, на какой период приходится пик вегетации за каждый рассматриваемый год. Для решения этой задачи проанализированы индексные изображения NDVI низкого пространственного разрешения, представленные на портале USGS EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). За пик вегетации приняты те даты, которым соответствовали максимальные значения NDVI в пределах рассматриваемой территории за каждый сезон с 2000 по 2023 г. Пик вегетации на исследуемой территории приходится на конец июля – начало августа. Однако годовая изменчивость выражена

заметно: даты наступления пика вегетационной активности в период с 2000 по 2023 г. могут варьировать от 15–21 июля до 13–19 августа.

Для каждого года отобраны снимки со спутников серии Landsat, охватывающие изучаемую территорию. На все рассматриваемые годы доступны снимки со спутника Landsat 7; на 2013 г. и позже также получены снимки со спутников Landsat 8–9; помимо этого, отобраны снимки со спутника Landsat 5, доступные для 2005–2008 и 2010–2011 гг. Помимо отобранных таким образом космических снимков за период 2000–2023 гг., в работе использован снимок со спутника Landsat 8 за 12.08.2024 г. (пик вегетационной активности – 5–11 августа 2024 г.), т. е. полученный непосредственно в период полевых обследований.

Расчет значений NDVI. Поскольку NDVI в нашей работе рассматривается как важнейший индикатор изучаемых изменений, необходима подготовка снимков перед его расчетом для приведения значений пикселов всех снимков к единым физическим величинам и в целях минимизации погрешностей, связанных с разным состоянием атмосферы в дни съемок и разными радиометрическими характеристиками съемочных систем [Fokeng, Fogwe, 2022]. Для этого с помощью QGIS Semi-Automatic Classification Plugin выполнен расчет значений спектральной плотности излучения и их атмосферная коррекция. Кроме того, с помощью алгоритма Algorithms.Landsat.simpleCloudScore в Google Earth Engine выполнена маска облачности – отсечены пиксели, которые алгоритм определил как относящиеся к облакам. Полученные по итогам этих операций растры использованы для расчета NDVI: отношения разности значений спектральной плотности излучения ближнего инфракрасного и красного диапазонов к их сумме.

Полевые исследования. Принимая во внимание значительную площадь исследуемого участка и его выраженное геоморфологическое разнообразие, решено проводить полевое дешифрирование растительного покрова по профилям [Лабутина, 2004]. Этот метод предполагает предварительное дешифрирование аэрокосмических материалов с целью отыскания участков с наибольшим разнообразием природно-территориальных комплексов. Наибольший интерес для нас представляют участки максимальных значений NDVI, так как к ним приурочены наилучшие с точки зрения рельефа, увлажненности и мерзлотных условий местообитания растительных сообществ, которые на этих участках вегетируют наиболее активно. Здесь можно ожидать интенсификацию мерзлотных процессов. По растру NDVI за 04.08.2016, после маскирования облачности наиболее полно охватывающему исследуемый участок, выбрано 4 профиля (рис. 1): 1) от вершины г. Перевальной

в долину руч. Мутного; 2) от вершины г. Вычтынай в долину руч. Серебряного и далее на побережье Мечигменского залива; 3) через долину р. Мал. Аккани в ее среднем течении; 4) от побережья Мечигменского залива близ с. Лаврентия в долину руч. Мутный. Такое расположение линий профилей позволяет охватить значительное разнообразие местообитаний, в том числе и тех, растительные сообщества в которых характеризуются максимальными на исследуемой территории значениями NDVI. Ландшафтное профилирование проведено в соответствии с методикой, принятой в Московской школе ландшафтования [Жучкова, Раковская, 2004]. Основная цель работ по ландшафтному профилированию – выявление связи между характеристиками растительного покрова (структурой и составом наблюдаемых растительных сообществ), геоморфологической позицией, особенностями мерзлотных условий и поверхностных отложений, в значительной степени определяемых ею, а также рассчитанными по актуальному космическому снимку (за 12.08.2024) значениями вегетационного индекса NDVI.

В ходе маршрутов составлена серия полных геоботанических описаний по стандартной методике [Юнатов, 1964] с дополнительной характеристикой мерзлотных процессов и поверхностных отложений. Точки геоботанических описаний запланированы в камеральных условиях с учетом изменений значений NDVI по линиям профилей. В пределах исследуемого участка выполнено 55 геоботанических описаний в сообществах кустарничковых, осоковых и лишайниковых тундр, а также на луговинах, приуроченных к долинам водотоков. В описаниях указан состав сообществ, обилие видов (в процентах проективного покрытия), а также характеристика местообитаний: координаты, положение в рельефе, уклон поверхности, мерзлотные условия, в частности глубина сезонного оттаивания, наличие мерзлотных форм микрорельефа и их размер. По результатам полевых обследований проведена обработка геоботанических описаний [Нешатаев, 1987], при рассмотрении итоговых таблиц применен метод эколого-флористического и эколого-ценотического анализа. Латинские названия видов растений даны по онлайн-базе данных Online database Plants of the World Online (<https://powo.science.kew.org>).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ландшафтное профилирование. В ходе полевых исследований выявлено, что максимальные значения NDVI ($>0,65$) характерны для растительных сообществ, сформированных различными видами ив (особенно кустарниковых), хвощами, белокопытником, а также для сообществ, в которых

злаки значительно преобладают над осоками, в том числе и где осоки полностью отсутствуют. Сообщества с чуть меньшей интенсивностью вегетации (от 0,5 до 0,65) – это преимущественно схожие по составу и структуре с вышеописанными, но со значительным обилием (и преобладанием) осок. Значения NDVI < 0,5 характерны для лишайниковых, мохово-лишайниковых, осоково-моховых, осоково-лишайниковых, лишайниково-кустарничковых и

кустарничково-лишайниковых тундр, занимающих верхние высотные уровни рельефа и каменистые участки. Дифференциация мерзлотных процессов определяется в наибольшей степени позицией в рельефе, поверхностными отложениями и характером дренирования территории: бугры пучения приурочены к суглинистым отложениям в долинах водотоков, а каменные многоугольники наблюдаются на каменистых вершинных поверхностях.

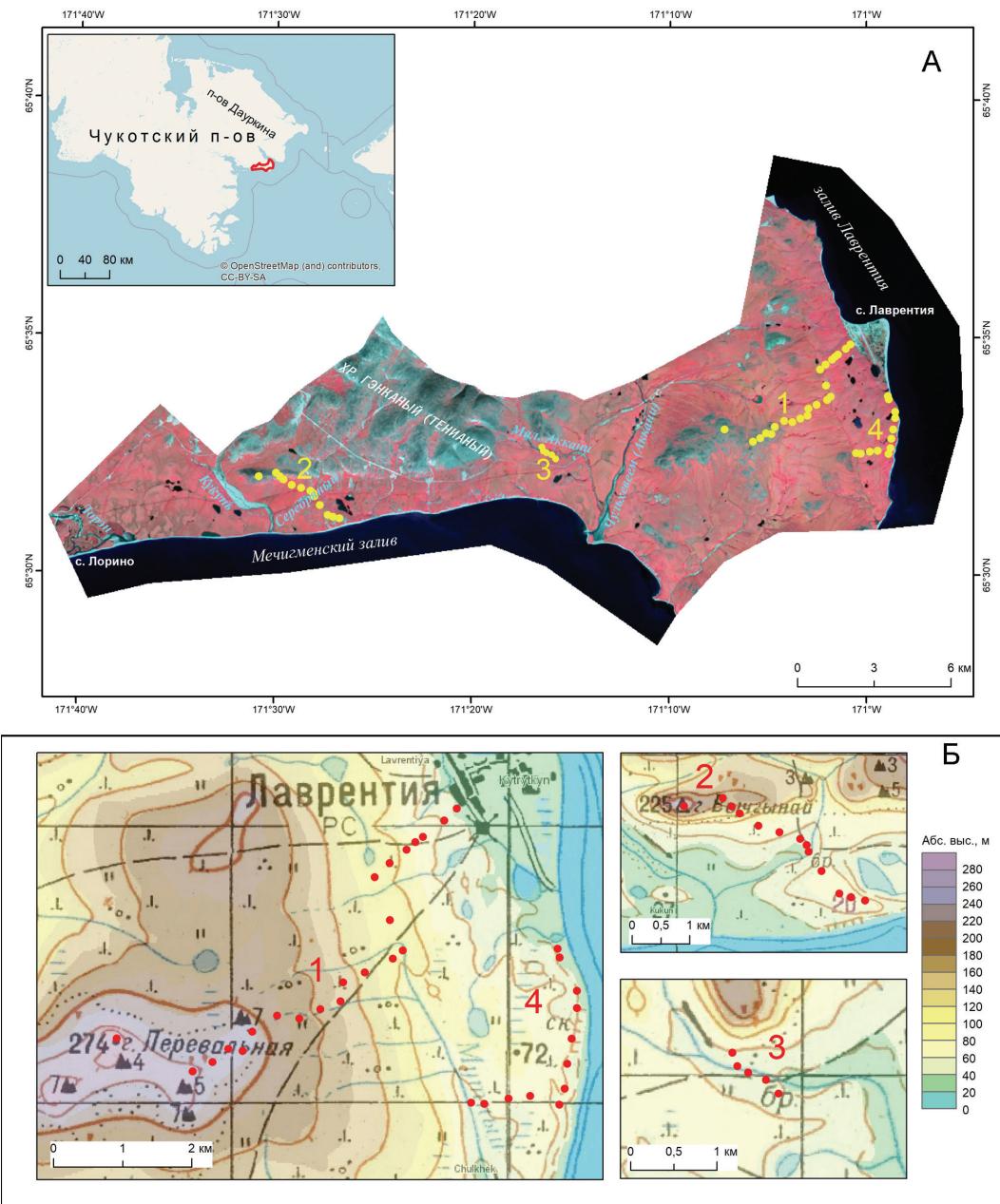


Рис. 1. Исследуемая территория и профили полевого дешифрирования (профили обозначены цифрами, точки соответствуют местам описаний): А – на снимке со спутника Landsat 8 от 4 августа 2016 г. в стандартных псевдоцветах; Б – на фрагменте топографической карты масштаба 1:200 000 и визуализации цифровой модели рельефа FABDEM с выделением высотных уровней каждые 20 м. Контур картографического изображения совпадает с границей исследуемой территории

Fig. 1. The study area and field interpretation profiles (profiles are designated by numbers, the dots correspond to the places of descriptions): А – on the Landsat 8 satellite image from August 4, 2016, in standard pseudo-colors; Б – on a fragment of a topographic map at a scale of 1:200 000 and a visualization of the FABDEM digital elevation model with the allocation of elevation levels every 20 m. The contour of the cartographic image coincides with the boundary of the study area

На ландшафтных профилях (рис. 2) отображены гипсометрическая кривая, данные о поверхностных отложениях, растительности, выделены границы ПТК. Дополнительно отражены проективное покрытие, значения NDVI, а также мерзлотные формы рельефа. Гипсометрическая кривая составлена по топографической карте (с полевым уточнением – фиксацией изменений высот по портативному

ГНСС-приемнику), данные о поверхностных отложениях, растительных сообществах и мерзлотных процессах собраны в ходе полевых работ. Границы на профиле проведены на уровне групп уроцищ, объединенных в местности [Анненская и др., 1962]. Условные обозначения использованы в соответствии с методическими указаниями А.А. Видиной [Видина, 1962].

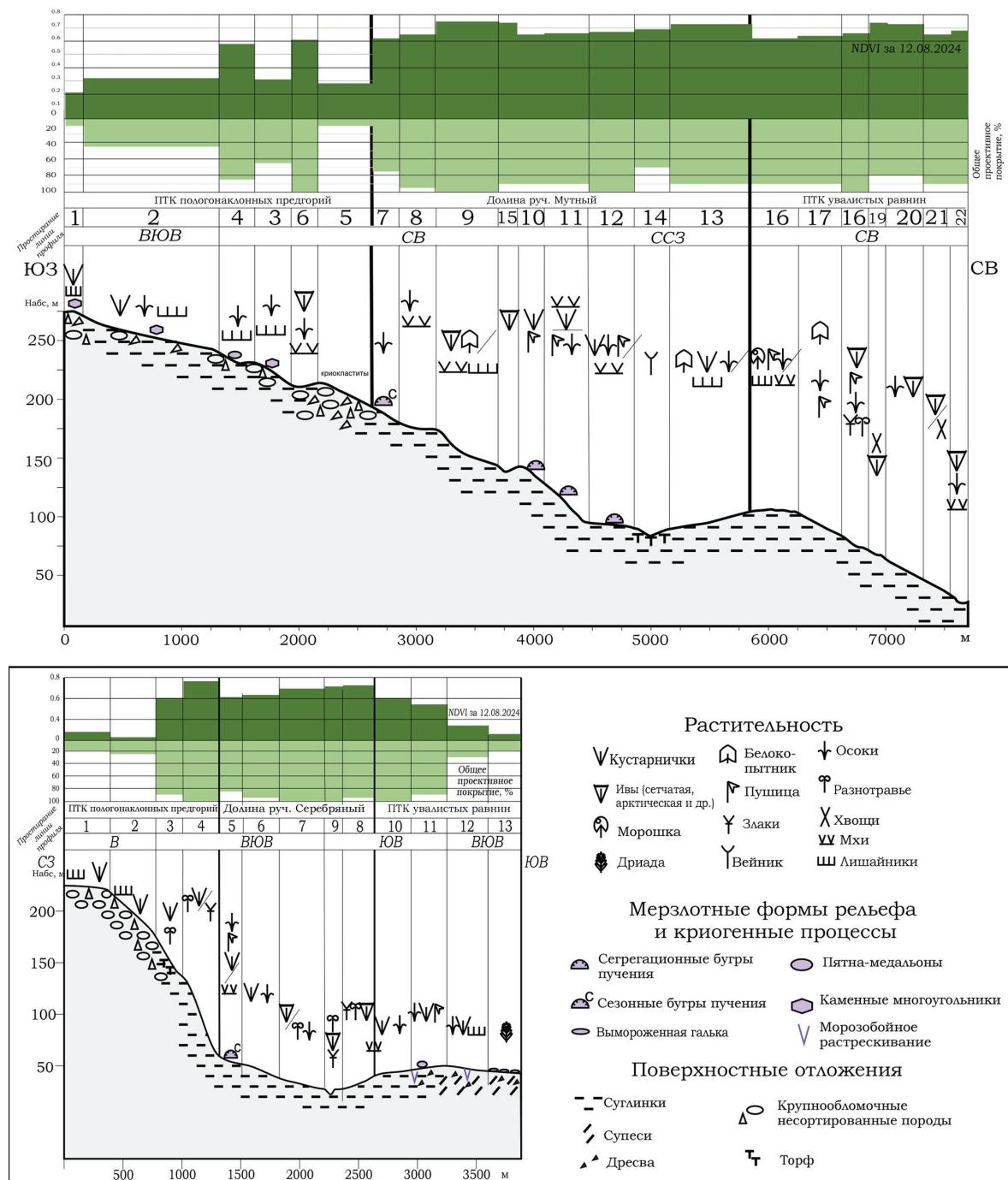


Рис. 2. Профили 1 (от вершины г. Перевальной в долину руч. Мутного – сверху) и 2 (от вершины г. Вычгынай в долину руч. Серебряного и далее на побережье Мечигменского залива – снизу)

Fig. 2. Profiles 1 (from the top of Mount Perevalnaya to the valley of the Mutny stream – from above) and 2 (from the top of Mount Vychgynay to the valley of the Serebryany stream and further to the coast of the Mechigmensky Gulf – from below)

Пространственная дифференциация растительного покрова. Материалы, полученные в ходе ландшафтного профилирования, а также в ходе рекогносцировочных полевых маршрутов позволили экстраполировать выявленные закономерности на всю территорию ключевого участка и составить карту растительности. По обобщенным названиям типичных фитоценозов, описанных в ходе полевых работ, даны приведенные в легенде карты названия групп растительных сообществ. Контуры растительности нанесены по космическому снимку со спутника Landsat 8 от 12.08.2024 г. с простран-

ственным разрешением 30 м. В качестве источника информации о рельефе использована топографическая карта масштаба 1:200 000 и цифровая модель рельефа FABDEM (<https://data.bris.ac.uk/data/dataset/s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn>) (рис. 3). Для выделения контуров растительного покрова использован космический снимок со спутника Landsat 8 от 12.08.2024 г., синтезированный в стандартных псевдоцветах (десифровочные признаки: цвет, текстура, форма), а также рассчитанное по этому снимку индексное изображение NDVI, квантованное по выделенным ранее пороговым значениям.

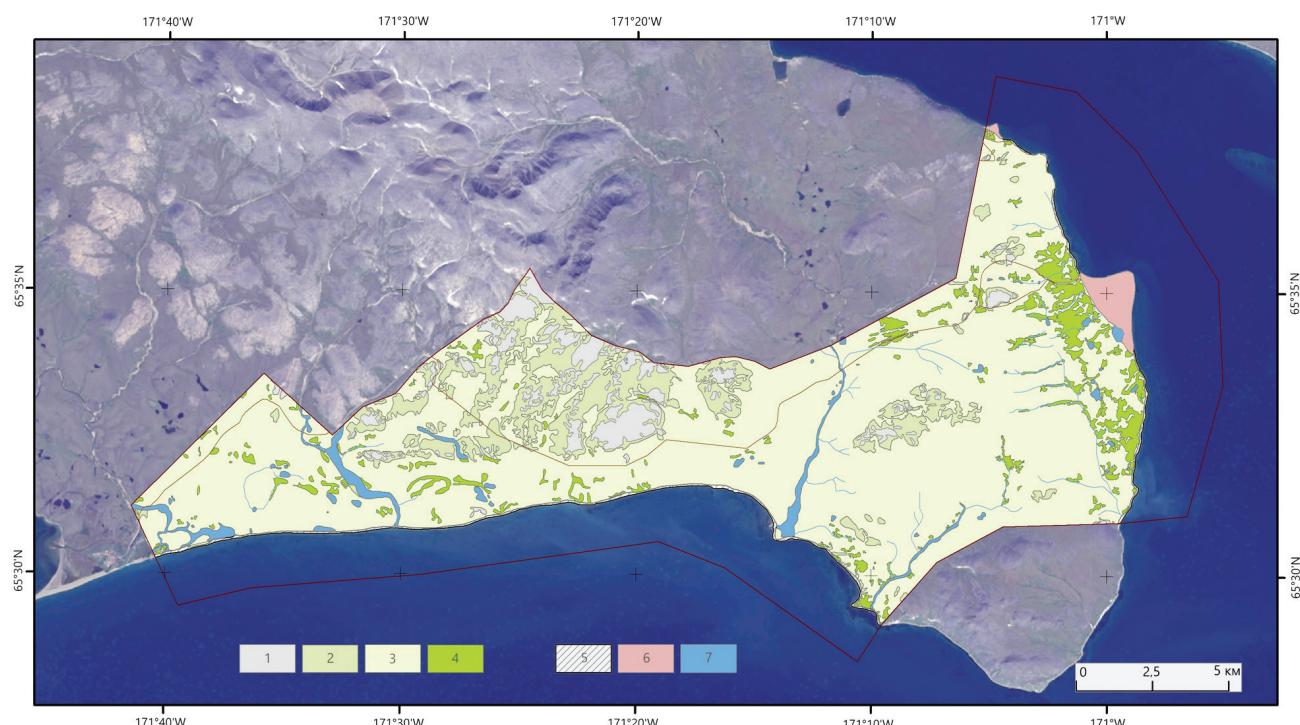


Рис. 3. Растительность исследуемого участка (карта наложена на снимок со спутника Landsat 8 от 04.08.2016 г.):
 1 – тольцы ($NDVI < 0,2$); 2 – горные тундры с разреженным растительным покровом, кустарничково(*Salix phlebophylla*, *Cassiope tetragona*, *Empetrum nigrum* subsp. *subholarcticum*)-лишайниковые(*Cladonia* spp., *Cetraria* spp.) ($0,2 < NDVI < 0,4$);
 3 – кочкарные тундры, осоко(*Carex membranacea*, *C. podocarpa*)-ивово(*Salix pulchra*, *S. arctica*)-гипновые и осоко(*Carex aquatilis* var. *minor*)-пушицево(*Eriophorum vaginatum*)-ивовые (*Salix pulchra*, *S. reticulata*) моховые по мочажинам в сочетании с разнотравно(*Petasites frigidus*, *Rubus chamaemorus*)-кустарничково(*Salix pulchra*, *Rhododendron tomentosum*, *Betula glandulosa*)-лишайниковыми тундрами по кочкам ($0,4 < NDVI < 0,65$); 4 – разнотравно(*Artemisia tilesii*, *Petasites frigidus*, *Polemonium villosum*)-ивово(*Salix reticulata*, *S. pulchra*)-злаковые (*Calamagrostis purpurascens* subsp. *purpurascens*, *Festuca altaica*) тундры в сочетании с хвошево(*Equisetum arvense*)-пушицево(*Eriophorum angustifolium*)-осоковыми (*Carex aquatilis* var. *minor*) тундровыми луговинами с участием кустарниковых ив (*Salix alaxensis*) ($0,65 < NDVI < 0,8$); 5 – лишенные растительности прибрежные участки; 6 – селитебные земли; 7 – водные объекты

Fig. 3. Vegetation of the study area (map covers Landsat 8 satellite image from 04.08.2016): 1 – alpine barrens ($NDVI < 0,2$); 2 – alpine tundra with sparse vegetation cover, dwarf shrub (*Salix phlebophylla*, *Cassiope tetragona*, *Empetrum nigrum* subsp. *subholarcticum*) – lichen (*Cladonia* spp., *Cetraria* spp.) ($0,2 < NDVI < 0,4$); 3 – hummock tundra, sedge (*Carex membranacea*, *C. podocarpa*) – dwarf willow (*Salix pulchra*, *S. arctica*) hypnum and sedge (*Carex aquatilis* var. *minor*) – cotton grass (*Eriophorum vaginatum*) – dwarf willow (*Salix pulchra*, *S. reticulata*) moss in the wet hollows with forb (*Petasites frigidus*, *Rubus chamaemorus*) – dwarf shrub (*Salix pulchra*, *Rhododendron tomentosum*, *Betula glandulosa*) – lichen tundra on the hummocks ($0,4 < NDVI < 0,65$); 4 – forb (*Artemisia tilesii*, *Petasites frigidus*, *Polemonium villosum*) – dwarf willow (*Salix reticulata*, *S. pulchra*) – grass (*Calamagrostis purpurascens* subsp. *purpurascens*, *Festuca altaica*) tundra with horsetail (*Equisetum arvense*) – cotton grass (*Eriophorum angustifolium*) – sedge (*Carex aquatilis* var. *minor*) tundra meadows with a presence of shrubby willows (*Salix alaxensis*) ($0,65 < NDVI < 0,8$); 5 – barren coastal areas; 6 – residential areas; 7 – water bodies

Карта отражает основные закономерности распределения сочетаний растительных сообществ на исследуемой территории. Выделено четыре группы растительных сообществ, отличных по структуре, флористическому составу и интенсивности вегетации (NDVI).

Преобладающей группой растительных сообществ, занимающей практически $\frac{3}{4}$ всей территории, являются кочкарные осоко-кустарничковые и осоко-пушицево-кустарничковые моховые тундры в сочетании с разнотравно-кустарничково-лишайниковыми тундрами, характеризующиеся значениями NDVI от 0,4 до 0,65. Упомянутые сообщества развиваются в основном на приморских равнинах и в низких частях горных склонов и нередко характеризуются выраженным микрорельефом – кочками, мочажинами и пятнами-медальонами диаметром до 2 м.

Около 10% исследуемой территории занимают кустарничково-лишайниковые горные тундры с низкой вегетационной активностью (значения NDVI от 0,2 до 0,4). Сообщества этой группы встречаются на вершинных и привершинных поверхностях и характеризуются развитием разреженного растительного покрова, связанным с высокой каменистостью этих участков (до 95%), наличием глыб и каменных многоугольников.

Сочетания наиболее активно вегетирующих растительных сообществ (значения NDVI выше 0,65), образующих группу разнотравно-кустарничково-злаковых, хвощово-пушицево-осоковых луговин и влажных тундр, занимают около 6% исследуемого участка. Именно в фитоценозах, отнесенных к данной группе, отмечено участие кустарников – ивы аляскинской (*Salix alaxensis* (Andersson) Coville), которая может служить индикатором сообществ с повышенной биопродуктивностью. Как показали исследования на территории п-ова Сьюард (Аляска, США), такие сообщества развиваются в местах наиболее интенсивного сезонного оттаивания – на дренированных участках вблизи берегов рек, ручьев и водоемов [Lloyd et al., 2003]. Сообщества этой группы характеризуются максимальным видовым разнообразием и участием редких и охраняемых видов растений, среди которых двенадцатицветник холодолюбивый (*Primula frigida* (Cham. & Schltl.) A.R.Mast & Reveal) [Красная книга..., 2022]. Еще меньшую по площади территорию занимают приуроченные к вершинным поверхностям гольцы (около 5%) с единичными сосудистыми растениями, разреженным лишайниковым покровом и, соответственно, наименьшей интенсивностью вегетации (NDVI менее 0,2). Наконец, еще 5% площади занято селитебными землями, лишенными растительности участками побережий и водными объектами.

Динамика NDVI. Анализ рассчитанных изображений NDVI позволяет выявить закономерности динамики этого вегетационного индекса на изучаемой территории (рис. 4).

Прежде всего, следует отметить устойчивое, хотя и довольно небольшое (до 0,3 за весь рассматриваемый период) повышение значений NDVI, характерное для всей территории. Для большей части территории характерно повышение значений менее чем на 0,1, что говорит об отсутствии выраженной трансформации растительных сообществ. Однако на отдельных участках отмечено более существенное изменение значений индекса. На рис. 5 и 6 представлены участки изучаемого полигона с наиболее характерными изменениями NDVI:

1) участок тундры в районе с. Лорино. Здесь отмечается рост NDVI на 0,1–0,2 в ложбинах водотоков, при этом в активно размываемой береговой зоне на юге участка отчетливо прослеживается полоса с отрицательным трендом NDVI;

2) окрестности руч. Серебряного. Отчетливо прослеживается рост NDVI вдоль вездеходных путей, в долинах ручьев, а также в целом по склону крутизной от 2 до 20° южной экспозиции. Абрационный морской берег также маркируется участками с отрицательными трендами NDVI;

3) долина р. Мал. Аккани (по которой проложен профиль № 3, отмечен крестиками). Рост NDVI здесь отмечается вдоль дороги Лаврентия – Лорино, в долине реки, а также в целом на склоне южной экспозиции в северной части участка;

4) участок вдоль профиля № 4, проложенного по увалистой водно-ледниковой равнине, имеющей высоту 40–80 м абс. Здесь локальный рост NDVI приурочен к застраивающим термоциркам и дренажным ложбинам; отрицательный тренд NDVI характерен для абрационного берегового уступа;

5) окрестности с. Лаврентия (профиль № 1). Здесь увеличение вегетационной активности растительного покрова приурочено не только к деллям, но и к локальным понижениям рельефа, образованным, по всей вероятности, в результате вытаивания подземных льдов, нередко обнажаемых в береговых термоцирках. Также видно пеструю картинку (как снижение, так и сильный рост NDVI) на территории застройки с. Лаврентия (северо-восток участка);

6) окрестности сопки Черной (на севере полигона). Этот район характеризуется наиболее выразительными изменениями NDVI, вызванными антропогенным воздействием. Отрицательные значения изменения NDVI маркируют карьеры и новый участок дороги Лаврентия – Лорино, построенный в 2014 г. Наибольший рост NDVI отмечается в местах некогда активного антропогенного воздействия, которые сейчас зарастают, –

свалка и сопка Черная в северной части участка. Также на востоке можно распознать следы дренирования озера, произошедшего в 2005 г.: положительный тренд NDVI приурочен к зарастающему

днищу его котловины, а отрицательные значения изменения NDVI маркируют образовавшийся термоэррозионный овраг, пересекающий дорогу с запада на восток.

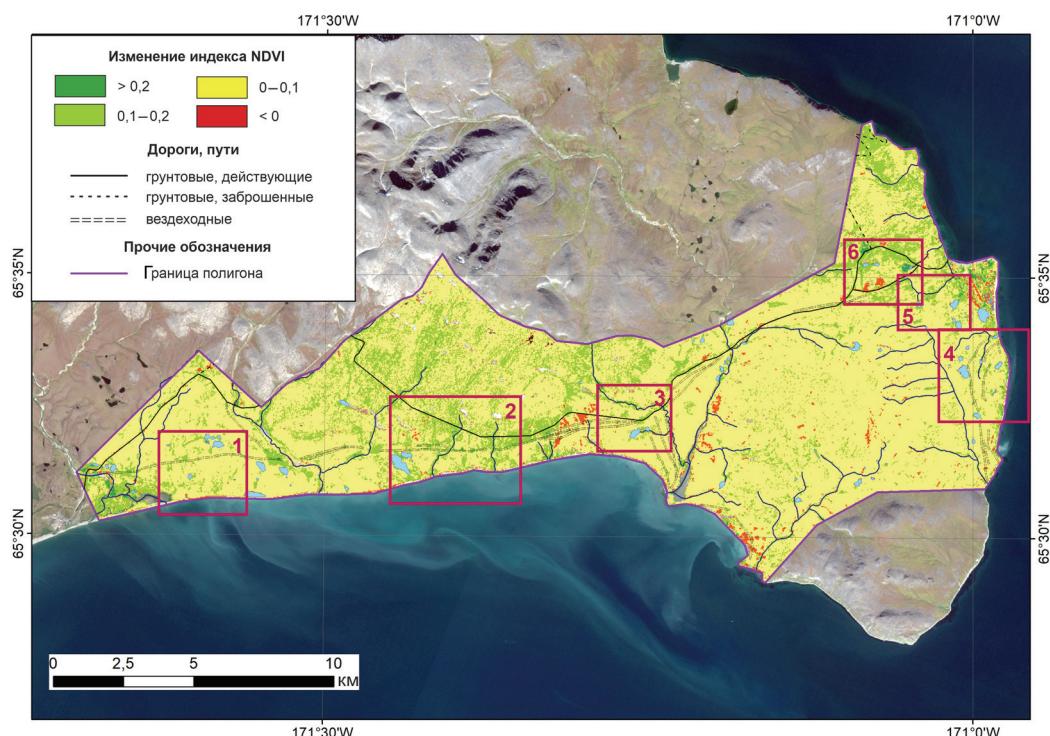


Рис. 4. Индексное изображение NDVI, полученное в результате вычитания из растра NDVI за 12.08.2024 г. медианного значения за 2002–2010 гг. 1–6 – участки с характерными изменениями NDVI, детальное показанное на рис. 5 (участки 1–3) и 6 (участки 4–6). В качестве фона использован снимок со спутника Landsat 7

Fig. 4. NDVI index difference between the median value for 2002–2010 and the NDVI raster for 12.08.2024. Rectangles 1–6 are areas with characteristic NDVI changes, shown in more detail in Fig. 5 (areas 1–3) and 6 (areas 4–6). A Landsat 7 satellite image was used as the background

Как было отмечено выше, наибольшее увеличение интенсивности вегетации за последние 20 лет для участка приморских равнин Восточной Чукотки характерно в целом для отрицательных форм рельефа – долин водотоков, деллей, днищ котловин дренированных озер и т. д. Фоновое увеличение NDVI на 0,1–0,2 характерно для равнинных и предгорных участков южной экспозиции, что согласуется с ранее сформулированным тезисом об активном распространении кустарниковой растительности в горнотундровых ландшафтах Чукотки [Frost, Epstein, 2014]. Можно предположить, что на исследуемом участке в связи с улучшением условий дренирования грунтов вблизи водотоков в луговых тундрах растет активность кустарников. В частности, на исследуемой территории в таких сообществах развивается ива аляскинская (*Salix alaxensis* (Andersson) Coville). За счет активации термокарста может происходить заболачивание, при этом кустарничковые сообщества сменяются осоково-моховыми. Локальные участки с

отрицательным трендом NDVI приурочены к местам активизации эрозионных процессов – термоэррозионным оврагам, морским отступающим берегам, меандрирующим руслам рек. Отсутствие динамики NDVI или слабовыраженное уменьшение значений индекса (от 0 до -0,1) характерно для плоских заболоченных участков, например, в пойме р. Чульхеевем (Аккани), окрестностей с. Лорино (Мечигмено-Ключинская депрессия), а также для северных макросклонов изучаемого района. Региональные оценки изменения биопродуктивности растительных покровов Арктики показывают [Frost et al., 2025], что за 1983–2023 гг. Чукотский полуостров, наряду с лесотундровой зоной, испытал наибольший рост индекса NDVI по сравнению с остальной тундровой зоной Северо-Восточной Сибири. Значительный рост вегетационного индекса также отмечается и в западном секторе Аляски, вызванный, впрочем, активным освоением тундровой растительностью днищ дренированных озер [Frost et al., 2025].

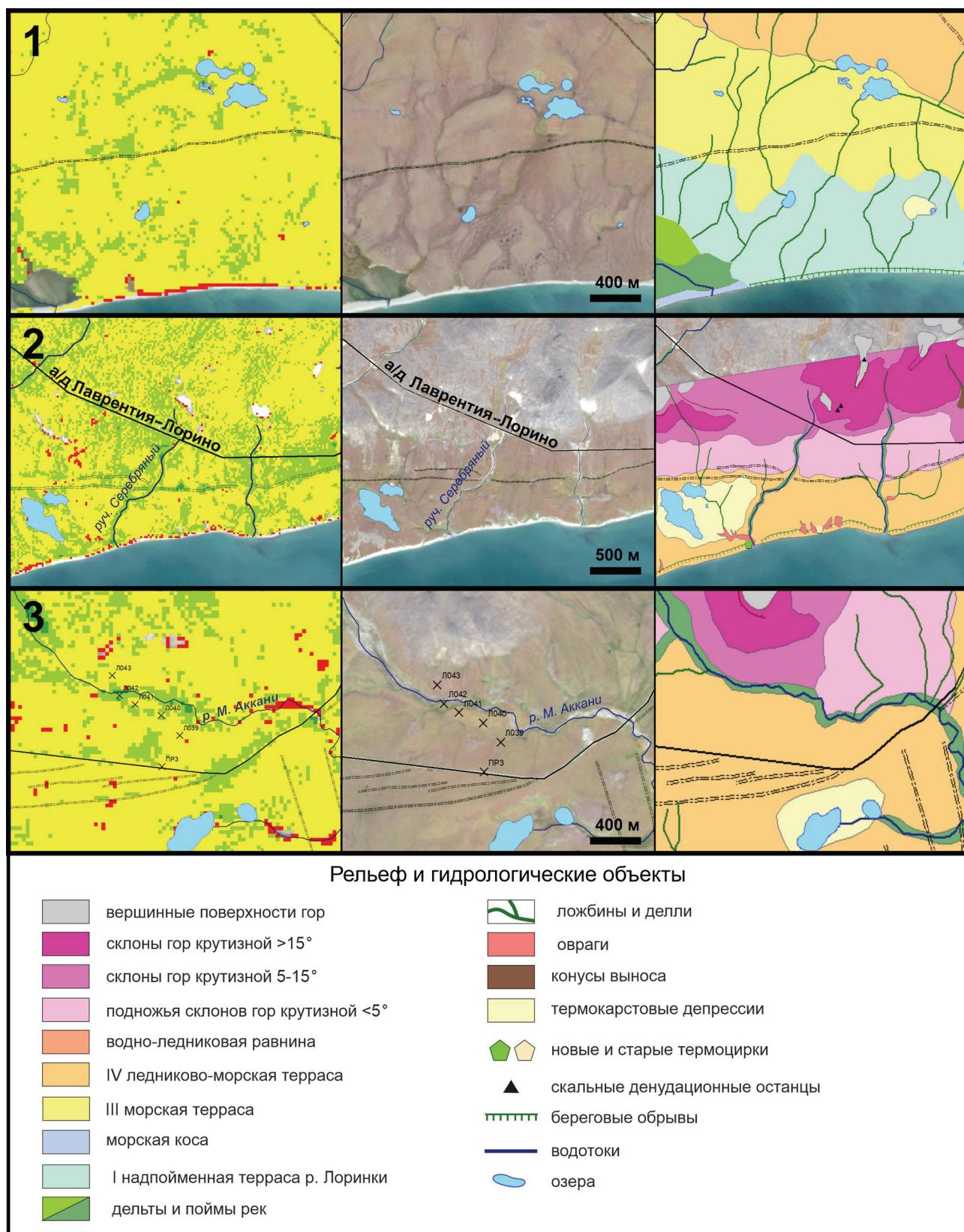


Рис. 5. Изменение NDVI для трех участков: 1 – лоринская тундра; 2 – окрестности руч. Серебряного; 3 – фрагмент долины р. Мал. Аккани (профиль № 3, отмечен крестиками). Условные обозначения представлены на рис. 4. Геоморфологические схемы взяты из [Maslakov et al., 2021]. В качестве фона использован снимок со спутника Landsat 7

Fig. 5. Change in NDVI for 3 areas: 1 – Lorino tundra; 2 – vicinity of the Serebryaniy stream; 3 – fragment of the Little Akkani river valley. Legend is presented in Fig. 4. Geomorphological schemes are taken from [Maslakov et al., 2021]. A Landsat 7 satellite image was used as a background

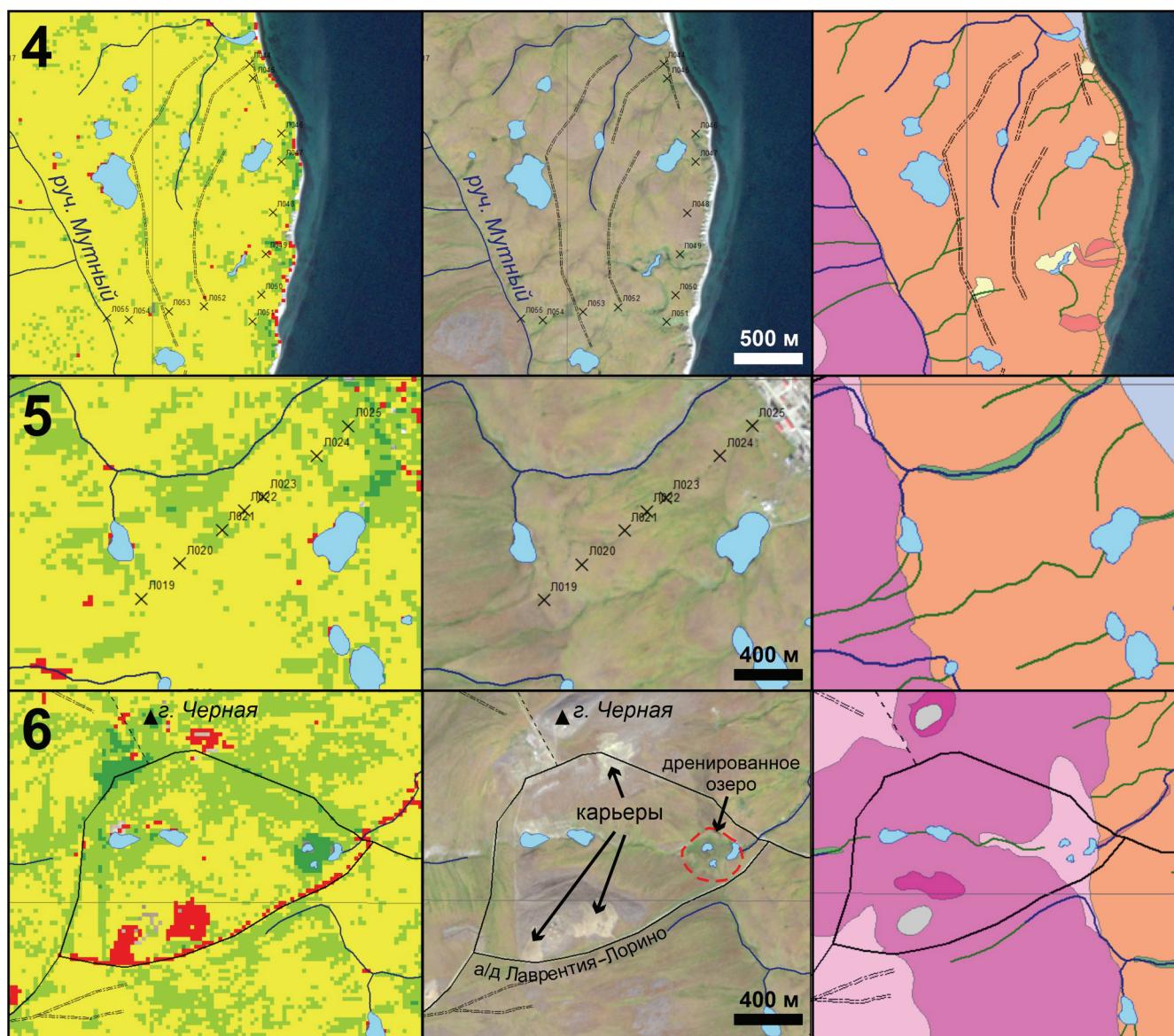


Рис. 6. Изменение NDVI для трех участков: 4 – водно-ледниковая равнина (профиль № 4, отмечен крестиками); 5 – окрестности с. Лаврентия (профиль № 1, отмечен крестиками); 6 – окрестности сопки Черной. Условные обозначения представлены на рис. 4. Геоморфологические схемы взяты из [Maslakov et al., 2021]. В качестве фона использован снимок со спутника Landsat 7

Fig. 6. Change in NDVI for 3 areas: 4 – fluvio-glacial plain; 5 – vicinity of the village of Lavrentiya; 6 – vicinity of Chernaya mount. Legend is presented in Fig. 4. Geomorphological schemes are taken from [Maslakov et al., 2021]. A Landsat 7 satellite image was used as a background

Несмотря на отсутствие на востоке Чукотки четких трендов климатических характеристик с серединией 2000-х гг., во второй половине XX в. здесь отмечался заметный рост температуры приземного воздуха: 0,6–0,7°C/10 лет за 1950–1980-е гг. с ускорением темпов до 1,1–1,2°C в 1990-е гг. [Maslakov et al., 2020]. Это привело к тому, что в начале XXI в. летняя теплообеспеченность (сумма положительных среднесуточных температур) выросла на 30% по сравнению со второй половиной XX в., что не могло не отразиться на природных (в т. ч. мерзлотных) условиях региона. В 2015–2020 гг. отмеча-

лось образование многочисленных естественных обнажений, вмещающих залежеобразующие льды, что, впрочем, дало возможность для их подробного изучения [Кузякин и др., 2024; Васильчук и др., 2025]. Мониторинг состояния СТС, проводимый на стационарных площадках изучаемого района с 2000 г., выявил, что опускание кровли многолетней мерзлоты происходит не столько за счет увеличения мощности СТС, сколько за счет опускания дневной поверхности в результате изотропной (т. е. без образования специфических форм рельефа) осадки при оттаивании сильно ледистого переходного слоя

мерзлоты [Маслаков и др., 2025]. Анализ изменения рельефа в пределах площадки «Лаврентия» выявил также, что за 2006–2023 гг. наибольшее относительное опускание дневной поверхности произошло в пределах ложбин стока дождевых и надмерзлотных вод (до 0,7 м), в то время как на участках между ложбинами поверхность опустилась незначительно (0,15–0,30 м), что повлияло на условия дренажа и, соответственно, произрастания растительности на площадке.

Многолетний мониторинг проективного покрытия растительности в пределах полигона «Приморские равнины Восточной Чукотки» показал, что за 2004–2024 гг. на участке «Лаврентия» в результате увеличения глубины оттаивания почвы и углубления ложбин стока происходит сокращение доли осок и мхов, вызванное улучшением условий дренирования. В то же время на слабодренированном участке «Лорино» рост глубины оттаивания привел к тому, что в сухие летние сезоны оттаивающие горизонты многолетней мерзлоты являются дополнительным источником влаги, что привело к сокращению проективного покрытия лишайников и кустарничков и росту доли осок [Maslakov et al., 2024]. Таким образом, отмеченные изменения в биопродуктивности в пределах равнинных участков полигона напрямую связаны с процессами деградации многолетней мерзлоты вследствие потепления климата.

Результаты анализа изменения индекса NDVI в совокупности с полевыми маршрутными геоботаническими исследованиями согласуются с ранее полученными сведениями. Рост летней теплообеспеченности территории Восточной Чукотки привел к оттаиванию ММП сверху, что спровоцировало на равнинных участках, сложенных дисперсными породами, активизацию криогенных процессов – термоабразии, термоэрозии, образования криогенных оползней, термокарста. В результате произошло образование новых отрицательных форм рельефа и углубление существующих [Кузякин и др., 2024; Маслаков и др., 2025], что в условиях сурового субарктического климата привело к улучшению условий произрастания тундровой растительности. Зимой в понижениях накапливается больше снега, препятствуя чрезмерному выхолаживанию почвы и более раннему ее оттаиванию, а летом образуется ветровая тень и замедляется конвективный теплообмен поверхности с атмосферой. Кроме того, улучшение условий дренирования в результате углубления ложбин стока привело к улучшению почвенного климата и активному зарастанию склонов ложбин, термоцирков и термокарстовых депрессий высокопродуктивными растениями – белокопытником, ивой, хвощом, злаками. В то же время для слабодренированных участков, где не отмечается

изменений в рельефе, рост летней теплообеспеченности в целом не спровоцировал увеличения индекса NDVI. Наоборот, на некоторых плоских участках, например в долине р. Чульхеем (Аккани), в результате слабого дренирования и поступления дополнительной влаги от оттаивающей мерзлоты отмечается снижение вегетационной активности. Для горных склонов, сложенных крупнообломочным материалом и занятых гольцами и кустарничково-лишайниковыми горными тундрами, изменение биопродуктивности напрямую зависит от их экспозиции: для южных склонов закономерно происходит увеличение NDVI, для северных – отсутствие изменения, реже слабое уменьшение.

Отдельно стоит отметить влияние антропогенеза на изменение вегетационной активности: рост NDVI характерен для отрицательных форм рельефа, образованных деятельностью человека (обочины дорог, въездоходные пути), а также в местах некогда активного хозяйственного освоения. Современная жилая застройка также способствует активному росту вегетационной активности растительных сообществ (до 0,4) вследствие ветрозащитных свойств инженерных объектов. Снижение вегетационной активности отмечается для участков антропогенных нарушений, образованных в 2004–2024 гг.: карьеров и новых дорог, однако в будущем эти участки будут зарастать и могут стать новыми очагами активного роста тундровой растительности.

ВЫВОДЫ

Полевые геоботанические исследования, проведенные на территории приморских равнин Восточной Чукотки, выявили пространственные закономерности условий произрастания тундровой растительности в зависимости от рельефа, распространения поверхностных отложений и изменения мерзлотных условий. Полученные сведения, дополненные анализом долгосрочных трендов изменения вегетационного индекса NDVI и сопоставленные с ранее опубликованными результатами мониторинга СТС и проективного покрытия растительности, позволили выявить картину современной трансформации растительного покрова в результате изменений климата и мерзлотных условий.

Выявлено небольшое (до 0,3), но устойчивое повышение значений NDVI, характерное для всей территории. Для большей части территории характерно повышение значений NDVI менее чем на 0,1, однако на отдельных участках отмечено более существенное изменение значений индекса, связанное с локальными понижениями рельефа и антропогенным воздействием.

Определен ряд растительных сообществ, отражающий спектр значений NDVI в пределах райо-

на исследований. Максимальные значения NDVI ($>0,65$) характерны для растительных сообществ, сформированных различными видами ив, хвощами, белокопытником, а также для сообществ, в которых злаки значительно преобладают над осоками. Сообщества с чуть меньшей интенсивностью вегетации (от 0,5 до 0,65) – это сообщества с преобладанием осок. Значения NDVI $< 0,5$ характерны для лишайниковых, мохово-лишайниковых, осоко-моховых, осоко-лишайниковых, лишайниково-кустарничковых и кустарничково-лишайниковых тундр, занимающих верхние высотные уровни рельефа и каменистые участки.

Преобладающей группой растительных сообществ являются кочкарные осоково-кустарничковые и осоко-пушицево-кустарничковые моховые тундры в сочетании с разнотравно-кустарничково-лишайниковыми тундрами, характеризующиеся значениями NDVI от 0,4 до 0,65. Эти сообщества довольно сбалансированы, для них характерен устойчивый, но очень слабо выраженный прирост вегетационной активности.

На равнинных участках повышение интенсивности вегетации за последние 20 лет характерно в целом для отрицательных форм рельефа, образованных как под воздействием природных факторов (долины водотоков, делли, днища котловин дренированных озер, термокарстовые котловины, термоцирки), так и при антропогенном воздействии (обочины дорог, вездеходные пути). В большей части случаев образование депрессий вызвано вытаиванием подземных льдов в результате роста летних температур воздуха, наблюдавшегося с середины XX в.

Оттаивание верхних горизонтов мерзлоты изменило условия дренирования, что также отразилось на условиях обитания растительных сообществ. На плоских участках в условиях слабого дренажа оттаивание мерзлоты увеличивает приток влаги в почву, что выражается в увеличении доли осок и уменьшении доли злаков и кустарничков и привело к снижению здесь вегетационного индекса NDVI. Для пологонаклонных участков, наоборот, углубление ложбин стока привело к улучшению условий дренажа и сокращению доли осок. На склонах ложбин и термокарстовых депрессий отмечается преобладание высокопродуктивных сообществ с участием кустарниковых ив, хвоща и злаково-разнотравных ассоциаций.

Для участков горной тундры ведущим фактором, определившим изменение вегетационной активности, стала экспозиция склонов: если для северных склонов изменения вегетационного индекса были незначительными, то для южных склонов отмечается рост NDVI на 0,1–0,2, что вызвано ростом теплообеспеченности этих участков.

Техногенез в целом является фактором увеличения вегетационной активности, поскольку повышает шероховатость дневной поверхности. Наиболее активный рост вегетационной активности растительных сообществ отмечен для территории жилой застройки – до 0,4 за 20 лет. Фоновое увеличение NDVI на 0,1–0,2 характерно также для участков никогда активного антропогенного воздействия. Локальное снижение вегетационной активности отмечается для недавно освоенных участков (карьеры, новые дороги), которое в будущем сменится зарастанием и соответствующим ростом NDVI.

Благодарности. Работа была выполнена в рамках проекта РНФ № 23-77-01016 «Трансформация криогенных ландшафтов приморских равнин Чукотки на фоне изменений климата». Работа М.Ю. Грищенко выполнена в рамках темы Гос. задания «Развитие методов и технологий картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях природы и общества» (номер 121051400061-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анненская Г.Н., Видина А.А., Жучкова В.К. и др. Морфологическая структура географического ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1962. 55 с.
- Афанасенко В.Е., Замолотчикова С.А., Тишин М.И. и др. Северо-Чукотский регион // Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. С. 280–293.
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Маслаков А.А. и др. Пластовые льды внутригрунтового генезиса на восточном побережье Чукотки: возраст и изотопный состав // Арктика: экология и экономика. 2025. Т. 15. № 1. С. 4–16. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-1-4-16.
- Видина А.А. Методические указания по полевым крупномасштабным ландшафтным исследованиям (для целей с.-х. производства в средней полосе Русской равнины) / под ред. Н.А. Солнцева. М.: МГУ, географический факультет, 1962. 120 с.
- Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. Эмпирико-статистическое моделирование растительной зональности в условиях изменения климата на территории России // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. М.: Планета, 2013. С. 360–374.
- Жучкова В.К., Раковская Э.М. Методы комплексных физико-географических исследований. М.: Академия, 2004. 368 с.
- Красная книга Чукотского автономного округа. Т. 2: Растения и грибы / отв. ред. М.Г. Хорева, Д.И. Литовка. Н. Новгород: Тексотел, 2022. 240 с.

- Кузякин Л.П., Маслаков А.А., Семенов П.Б. и др.** Метан в пластовых льдах Восточной Чукотки как индикатор их генезиса // Лед и Снег. 2024. Т. 64. № 3. С. 447–463. DOI: 10.31857/s2076673424030106.
- Лабутина И.А.** Дешифрирование аэрокосмических снимков: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Аспект Пресс, 2004. 181 с.
- Маслаков А.А., Стрелецкий Д.А., Замолодчиков Д.Г.** Многолетний мониторинг осадки почв и верхней толщи многолетнемерзлых пород на площадке научного полигона «Приморские равнины Восточной Чукотки» // Криосфера Земли. 2025. Т. XXIX. № 5. С. 3–19. DOI: 10.15372/KZ20250501.
- Москаленко Н.Г., Джоергенсон Т., Каневский М.З. и др.** Взаимосвязи растительности и сезонного протаивания многолетнемерзлых пород в арктических тундрах Ямала и Аляски // Известия Русского географического общества. 2014. Т. 146. № 3. С. 64–79.
- Нешатаев Ю.Н.** Методы анализа геоботанических материалов: учеб. пособие. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. 192 с.
- Тыртыков А.П.** Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. 192 с.
- Юнатов А.А.** Типы и содержание геоботанических исследований // Полевая геоботаника. Л.: Наука, 1964. Т. 3. С. 9–36.
- Abramov A., Davydov S., Ivashchenko A. et al.** Two decades of active layer thickness monitoring in northeastern Asia, *Polar Geography*, 2021, vol. 44(3), p. 186–202, DOI: 10.1080/1088937X.2019.1648581.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al.** Permafrost is warming at a global scale, *Nature communications*, 2019, vol. 10(1), article ID: 264, DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
- Fokeng R.M., Fogwe Z.N.** Landsat NDVI-based vegetation degradation dynamics and its response to rainfall variability and anthropogenic stressors in Southern Bui Plateau, Cameroon, *Geosystems and Geoenvironment*, 2022, vol. 1, iss. 3, DOI: 10.1016/j.geogeo.2022.100075.
- Frost G.V., Bhatt U.S., Epstein H.E. et al.** Arctic Report Card 2020: Tundra Greenness (NOAA, 2020), DOI: 10.25923/46rm-0w23.
- Frost G.V., Bhatt U.S., Macander M.J. et al.** The changing face of the Arctic: four decades of greening and implications for tundra ecosystems, *Frontiers in Environmental Science*, 2025, vol. 13, 1525574, DOI: 10.3389/fenvs.2025.1525574.
- Frost G.V., Epstein H.E.** Tall shrub and tree expansion in Siberian tundra ecotones since the 1960s, *Global change biology*, 2014, vol. 20, no. 4, p. 1264–1277, DOI: 10.1111/gcb.12406.
- Guo W.C., Liu H.Y., Anenkhonov O.A. et al.** Vegetation can strongly regulate permafrost degradation at its southern edge through changing surface freeze-thaw processes, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, vol. 252, p. 10–17, DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.01.010.
- Heijmans M.M., Magnússon R.I., Lara M.J. et al.** Tundra vegetation change and impacts on permafrost, *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, vol. 3(1), p. 68–84, DOI: 10.1038/s43017-021-00233-0.
- Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D. et al.** Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North, *Polar Geography*, 2021, vol. 44, iss. 3, p. 203–216, DOI: 10.1080/1088937X.2021.1981476.
- Kokelj S.V., Jorgenson M.T.** Advances in thermokarst research, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2013, vol. 24, no. 2, p. 108–119, DOI: 10.1002/ppp.1779.
- Lloyd A.H., Yoshikawa K., Fastie C.L. et al.** Effects of permafrost degradation on woody vegetation at arctic treeline on the Seward Peninsula, Alaska, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, no. 2, p. 93–101.
- Maslakov A., Grishchenko M., Grigoryan A. et al.** Long-term effect of warming-induced permafrost thawing on tundra vegetation – the evidence from the Chukchi Peninsula (Russian northeast), *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijić" SASA*, 2024, vol. 74, iss. 3, p. 291–309, DOI: 10.2298/IJGI2403291M.
- Maslakov A.A., Nyland K.E., Komova N.N. et al.** Community ice cellars in eastern Chukotka: Climatic and anthropogenic influences on structural stability, *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 3, p. 49–56, DOI: 10.24057/2071-9388-2020-71.
- Maslakov A., Zotova L., Komova N. et al.** Vulnerability of the Permafrost Landscapes in the Eastern Chukotka Coastal Plains to Human Impact and Climate Change, *Land*, 2021, vol. 10, no. 5, article ID: 445, p. 1–15, DOI: 10.3390/land10050445.
- Nyland K.E., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A. et al.** Long-term circumpolar active layer monitoring (CALM) program observations in Northern Alaskan tundra, *Polar Geography*, 2021, vol. 44, iss. 3, p. 167–185, DOI: 10.1080/1088937X.2021.1988000.
- Rantanen M., Karpechko A.Y., Lippinen A. et al.** The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979, *Communications Earth & Environment*, 2022, vol. 3, DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3.
- Rudy A.C., Lamoureux S.F., Treitz P. et al.** Identifying permafrost slope disturbance using multi-temporal optical satellite images and change detection techniques, *Cold Regions Science and Technology*, 2013, vol. 88, p. 37–49, DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.12.008.
- Streletskiy D.A., Maslakov A., Grosse G. et al.** Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere-review and perspectives, *Environmental Research Letters*, 2024, vol. 20, no. 1, DOI: 10.1088/1748-9326/ada2ff.
- Valentini R., Zamolodchikov D., Reyer C. et al.** Climate change in Russia – past, present and future, *Russian forests and climate change. What science can tell us*, European Forest Institute, 2020, vol. 11, p. 45–52, DOI: 10.36333/wsctu11.
- Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G. et al.** Permafrost degradation in the western Russian arctic, *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15, no. 4, DOI: 10.1088/1748-9326/ab6f12.
- 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, iss. 10, DOI: 10.1029/2023EF004309.

Поступила в редакцию 13.08.2025

После доработки 25.09.2025

Принята к публикации 17.10.2025

NDVI AS AN INDICATOR OF CRYOGENIC PROCESSES AND TECHNOGENESIS DYNAMICS ON THE CHUKOTKA PENINSULA

M.Yu. Grishchenko¹, A.A. Maslakov², A.G. Grigoryan³, I.A. Aldoshin⁴

^{1–4}*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹*Department of Cartography and Geoinformatics*

²*Research Laboratory of Geoeontology of the North*

³*Department of Biogeography*

⁴*Department of Physical geography and Landscape Science*

¹*Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: m.gri@geogr.msu.ru*

²*Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru*

³*Master student; e-mail: 21270iv@gmail.com*

⁴*Master student; e-mail: aldoshin.ilia@yandex.ru*

The current climate change in the Arctic has a significant impact on permafrost situation of the region, which, in its turn, determines the growth conditions of aboveground vegetation cover. The work is devoted to identifying spatial patterns in environmental conditions of tundra vegetation growth, topography, surface deposits and permafrost conditions for a study area within the Chukotka Peninsula. The results of field survey, supplemented by the analysis of long-term trends of the NDVI vegetation index and correlated with long-term monitoring data on the active layer thickness and projective cover of vegetation, made it possible to reveal the current evolution of the vegetation cover as a result of climate change and anthropogenic impact. A spatial sequence of plant communities was lined up, reflecting the range of NDVI values within the study area. A weak (up to 0,3 for 20 years) but stable increase in NDVI values was revealed for the entire study area. Within plains the increase in vegetation growth intensity over the past 20 years is generally confined to the topographic depressions formed both under the influence of natural conditions and the anthropogenic impact. In the long-term the latter could become a driver of bioproductivity, since it increases the roughness of the surface. The results show that under climate warming in the Arctic the dynamics of permafrost conditions in the cryolithic zone is the leading factor determining the change in the growing conditions of tundra vegetation in the Chukotka Peninsula.

Keywords: permafrost, vegetation, active layer, tundra, climate change

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-77-01016 “The transformation of cryogenic environment of Chukotka coastal plains due to climate change”). M.Yu. Grishchenko worked within the framework of the State assignment “Development of methods and technologies of cartography, geoinformatics and aerospace sensing in studies of nature and society” (number 121051400061-9).

REFERENCES

- Abramov A., Davydov S., Ivaschenko A. et al. Two decades of active layer thickness monitoring in northeastern Asia, *Polar Geography*, 2021, vol. 44(3), p. 186–202, DOI: 10.1080/1088937X.2019.1648581.
- Afanasenko V.E., Zamolotchkova S.A., Tishin M.I. et al. [North Chukchi region], *Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir i Dal'ni Vostok* [Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East], E.D. Ershova (ed.), Moscow, Nedra Publ., 1989, p. 280–293. (In Russian)
- Annenskaya G.N., Vidina A.A., Zhuchkova VK. et al. *Morfologicheskaya struktura geograficheskogo landshafta* [Morphological structure of the geographical landscape], Moscow, Moscow University Press, 1962, 55 p. (In Russian)
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale, *Nature communications*, 2019, vol. 10(1), DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
- Fokeng R.M., Fogwe Z.N. Landsat NDVI-based vegetation degradation dynamics and its response to rainfall variability and anthropogenic stressors in Southern Bui Plateau, Cameroon, *Geosystems and Geoenvironment*, 2022, vol. 1, iss. 3, DOI: 10.1016/j.geogeo.2022.100075.
- Frost G.V., Epstein H.E. Tall shrub and tree expansion in Siberian tundra ecotones since the 1960s., *Global change biology*, 2014, vol. 20, no. 4, 1264–1277, DOI: 10.1111/gcb.12406.
- Frost G.V., Bhatt U.S., Epstein H.E. et al. *Arctic Report Card 2020: Tundra Greenness* (NOAA, 2020), DOI: 10.25923/46rm-0w23.
- Frost G.V., Bhatt U.S., Macander M.J. et al. The changing face of the Arctic: four decades of greening and implications for tundra ecosystems, *Frontiers in Environmental Science*, 2025, 13, 1525574, DOI: 10.3389/fenvs.2025.1525574.
- Guo W.C., Liu H.Y., Anenkhonov O.A. et al. Vegetation can strongly regulate permafrost degradation at its southern edge through changing surface freeze-thaw processes, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, vol. 252, p. 10–17, DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.01.010.
- Heijmans M.M., Magnússon R.Í., Lara M.J. et al. Tundra vegetation change and impacts on permafrost, *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, vol. 3(1), p. 68–84, DOI: 10.1038/s43017-021-00233-0.
- Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D. et al. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North, *Polar Geography*, 2021, vol. 44, iss. 3, p. 203–216, DOI: 10.1080/1088937X.2021.1981476.

- Kokelj S.V., Jorgenson M.T. Advances in thermokarst research, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2013, vol. 24, no. 2, p. 108–119, DOI: 10.1002/ppp.1779.
- Krasnaya kniga Chukotskogo avtonomnogo okruga, Tom 2, Rasteniya i griby (ofitsial'noe izdanie)* [Red Book of Chukotka Autonomous Okrug. Rare and Endangered Species of Plants and Fungi], M.G. Khoreva, D.I. Litovka (eds.), Nizhny Novgorod, Tekstotek Publ., 2022, 240 p. (In Russian)
- Kuzyakin L.P. Maslakov A.A., Semenov P.B. et al. *Metan v plastykh l'dakh Vostochnoi Chukotki kak indikator ikh genezisa* [Methane in massive ice beds of Eastern Chukotka as an indicator of their origin], *Led i Sneg*, vol. 64, no. 3, p. 447–463, DOI: 10.31857/s2076673424030106. (In Russian)
- Labutina I.A. *Deshifrovanie aerokosmicheskikh snimkov: ucheb. posobie dlya studentov vuzov* [Aerial photo interpretation: Textbook. Manual for university students], Moscow, Aspekt Press, 2004, 181 p. (In Russian)
- Lloyd A.H., Yoshikawa K., Fastie C.L. et al. Effects of permafrost degradation on woody vegetation at arctic tree-line on the Seward Peninsula, Alaska, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, no. 2, p. 93–101.
- Maslakov A., Grishchenko M., Grigoryan A. et al. Long-term effect of warming-induced permafrost thawing on tundra vegetation – the evidence from the Chukchi Peninsula (Russian northeast), *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijić" SASA*, 2024, vol. 74, iss. 3, p. 291–309, DOI: 10.2298/IJGI2403291M.
- Maslakov A., Zotova L., Komova N. et al. Vulnerability of the Permafrost Landscapes in the Eastern Chukotka Coastal Plains to Human Impact and Climate Change, *Land*, 2021, vol. 10, no. 5, p. 1–15, DOI: 10.3390/land10050445.
- Maslakov A.A., Nyland K.E., Komova N.N. et al. Community ice cellars in eastern Chukotka: Climatic and anthropogenic influences on structural stability, *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 3, p. 49–56, DOI: 10.24057/2071-9388-2020-71.
- Maslakov A.A., Strelets D.A., Zamolodchikov D.G. Mnogoletni monitoring osadki pochv i verhney tolshchi mnogoletnemyorzhlyh porod na ploschadke nauchnogo poligona "Primorskiye ravniny Mostochnoy Chukotki" [Long-term monitoring of soil and surficial permafrost thaw subsidence on Eastern Chukotka Coastal Plain research station], *Kriosfera Zemli*, 2025, vol. 29, no. 5, p. 3–19. (In Russian)
- Moskalenko N.G., Dzhoergenson T., Kanevskii M.Z. et al. Vzaimosvyazi rastitel'nosti i sezonnogo protaivaniya mnogoletnemeryorzhlyh porod v arktycheskikh tundrakh Yamala i Alyaski [The comparative analysis of vegetation and permafrost in arctic tundras of Yamal and Alaska], *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2014, vol. 146, no. 3, p. 64–79. (In Russian)
- Neshataev Yu.N. *Metody analiza geobotanicheskikh materialov: Uchebnoe posobiye* [Methods of analysis of geobotanical materials: Textbook. Manual], Leningrad, Publishing house of Leningrad University, 1987, 192 p. (In Russian)
- Nyland K.E. Shiklomanov N.I., Strelets D.A. et al. Long-term circumpolar active layer monitoring (CALM) program observations in Northern Alaskan tundra, *Polar Geography*, 2021, vol. 44, iss. 3, p. 167–185, DOI: 10.1080/1088937X.2021.1988000.
- Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979, *Communications Earth & Environment*, 2022, vol. 3, DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3.
- Rudy A.C., Lamoureux S.F., Treitz P. et al. Identifying permafrost slope disturbance using multi-temporal optical satellite images and change detection techniques, *Cold Regions Science and Technology*, 2013, vol. 88, p. 37–49, DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.12.008.
- Stow D.A., Hope A., McGuire D. et al. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems, *Remote sensing of environment*, 2004, vol. 89, iss. 3, p. 281–308, DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.018.
- Strelets D. A., Maslakov A., Grosse G. et al. Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere-review and perspectives, *Environmental Research Letters*, 2024, vol. 20, no 1, Article ID: 013006, DOI: 10.1088/1748-9326/ada2ff.
- Tyrtikov A.P. *Vliyanie rastitel'nogo pokrova na promerzanie i protaivanie gruntov* [Influence of vegetation cover on freezing and thawing of soils], Moscow, Moscow University Press, 1969, 192 p. (In Russian)
- Valentini R., Zamolodchikov D., Reyer C. et al. Climate change in Russia – past, present and future, *Russian forests and climate change. What science can tell us*, European Forest Institute, 2020, vol. 11, p. 45–52, DOI: 10.36333/wsctu11.
- Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Maslakov A.A. et al. Plastovye l'dy vnutrigruntovogo genezisa na vostochnom poberezh'e Chukotki: vozrast i izotopnyi sostav [Massive ice bodies of ground origin on the eastern coast of Chukotka: age and isotopic composition], *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2025, vol. 15, no. 1, p. 4–16, DOI: 10.25283/2223-4594-2025-1-4-16. (In Russian)
- Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G. et al. Permafrost degradation in the western Russian Arctic, *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15, no. 4, DOI: 10.1088/1748-9326/ab6f12.
- Vidina A.A. *Metodicheskie ukazaniya po polevym krupnomasshtabnym landscape issledovaniyam (Dlya tseleis.-kh. proizvodstva v sred. polose Russkoi ravniny)* [Guidance on field large-scale landscape studies (for agricultural production in the middle of the Russian Plain)], Moscow, Moscow University Press, 1962, 120 p. (In Russian)
- 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, iss. 10, DOI: 10.1029/2023EF004309.
- Yunatov A.A. [Types and content of geobotany studies], *Polevaya geobotanika* [Field geobotany], 1964, Lenigrad, Nauka Publ., vol. 3, p. 9–36. (In Russian)
- Zhil'tsova E.L., Anisimov O.A. [Empirico-statistical modeling of vegetation zonation under climate change in Russia], *Problemy ekologicheskogo modelirovaniya i monitoringa ekosistem* [Problems of ecological modeling and ecosystem monitoring], Moscow, Planeta Publ., 2013, p. 360–374. (In Russian)
- Zhuchkova V.K., Rakovskaya E.M. *Metody kompleksnykh fiziko-geograficheskikh issledovanii* [Methods of complex physical-geographical investigations], Moscow, Akademiya Publ., 2004, 368 p. (In Russian)

Received 13.08.2025

Revised 25.09.2025

Accepted 17.10.2025