

КЛИМАТОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЛАНДШАФТОВ КУРУМОВ НА ЗАПАДЕ СРЕДНЕСИБИРСКОГО ПЛОСКОГОРЬЯ В ЗОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ

А.А. Высоцкая¹, А.А. Медведков²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
кафедра физической географии мира и геоэкологии*

¹ *Аспирант; e-mail: an.vys@yandex.ru*

² *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: a-medvedkov@bk.ru*

Рассмотрено изменение биопродукционных показателей на курумных склонах западной части Среднесибирского плоскогорья в условиях современного потепления климата. Оценено изменение теплообеспеченности за период с 1991 по 2020 г. по сравнению с 1961–1990 гг., отмечено увеличение суммы активных температур воздуха выше 5 и 10°C в среднем на 165°C и на 8 дней в каждом из случаев. Курумные склоны в районах исследования дешифрированы на основе обработки данных дистанционного зондирования (космических снимков серии Landsat с 30-метровым разрешением и Sentinel-2 с 10-метровым разрешением), рассчитаны ряды вегетационных индексов (NDVI и NDMI) с использованием архивов указанных снимков. Это позволило оценить динамику фотосинтетически активной фитомассы и увлажнения наземного покрова с 1992 по 2023 г. Значения индексов рассчитаны как максимальные за вегетационный период (июль–август) анализируемого года по всем доступным для наблюдения малооблачным сценам Landsat и Sentinel-2. В целом межгодовое изменение усредненных по анализируемым курумам величин NDVI и NDMI имеет тенденцию к росту. Отмечается положительная динамика в колебаниях обоих вегетационных индексов за исследуемый период. Проведена типизация курумных ландшафтов по скорости их зарастания, выявлены курумы с наибольшей, средней и наименьшей разницей полученных значений и оценено их пространственное распределение. Проанализирована роль морфометрических характеристик склонов (в т. ч. их экспозиции) в процессах зарастания курумов. Выявлено, что максимальные величины прироста значений вегетационных индексов соответствуют склонам холодных экспозиций (северной, северо-западной и восточной), а влияние крутизны незначительно. Положительная динамика значений вегетационных индексов позволяет говорить о «позеленении» курумных ландшафтов, что также подтверждается результатами повторных исследований на ключевых участках. Зарастание курумов проявляется в увеличении площади и мощности мохово-лишайникового покрова, появлении кустарников, активного роста молодых мелколиственных деревьев и редкого подроста хвойных пород. «Позеленение» курумных склонов сопровождается вытаиванием гольцового льда, поэтому среднетаежные курумы Среднесибирского плоскогорья переходят в состояния, более характерные для южной тайги, что свидетельствует об изменении зонально-ландшафтных условий в районах их развития.

Ключевые слова: перигляциальная среда, каменные глетчеры, потепление климата, дистанционные данные, спектральные характеристики, изменения растительности, деградация многолетней мерзлоты, Енисейская Сибирь

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.2

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением оценки состояния ландшафтов в условиях изменения климата является изучение информативных природных объектов, характеризующихся наибольшей чувствительностью к внешним воздействиям. В данном качестве могут выступать отдельные типы природных комплексов разного иерархического ранга, располагающиеся в экотонных условиях. В ландшафтах-экотонах природные процессы протекают значительно быстрее, а явления-отклики наиболее доступны для натуральных наблюдений [Медведков, 2016; Медвед-

ков, 2018]. Весьма информативны в этом контексте природные объекты в пределах южной криолитозоны (т. е. функционирующие в условиях островного и прерывистого развития высокотемпературных многолетнемерзлых пород), подверженные большей изменчивостью при трансформации климатических условий [Горшков и др., 2003].

Применительно к условиям Среднесибирского плоскогорья, ландшафты курумов в сибирской тайге являются одним из наиболее откликающихся типов природных комплексов на потепление климата [Медведков, 2014; Medvedkov, 2016], что заметно

отражается на их состоянии и внешнем облике. Сегодня происходит зарастание протаявших курумов¹ лишайниками, кустарничками и отдельными деревьями [Медведков, 2016; Медведков, 2018]. Выявленные в ходе повторных наблюдений изменения могут быть экстраполированы на значительно большие по охвату территории с использованием данных дистанционного зондирования (ДДЗ).

Курумы представляют собой скопления преимущественно глыбового материала на склоновых поверхностях, имеющие криогенный генезис и покровный характер залегания, в связи с чем их образно называют «каменными реками» или «каменными морями». Вместе с тем имеются и некоторые расхождения в представлениях о курумах как геологических образованиях, связанные с их происхождением, размером глыб и характером движения [Железняк и др., 1992]. В целом, несмотря на относительную изученность курумов с точки зрения геоэкологии и инженерной геологии, исследовательских работ по их ландшафтному анализу и индикаторной роли чрезвычайно мало. Вместе с тем курумы – это не только один из типов склоновых десерпционных отложений, их также можно рассматривать и как специфичные ландшафты, обладающие рядом отличительных особенностей (сортировка материала в вертикальном разрезе от крупных глыб к мелкозему, развитие курумодесерпции, суффозии и гольцового льдообразования, разреженная растительность, почвы скелетные или неполного развития). Данные специфические черты объединяют курум в единую геосистему, целостно реагирующую на климатические сигналы и одновременно взаимосвязанную с соседними ландшафтами посредством сложных вещественно-энергетических потоков (в том числе через солифлюкционные процессы, поверхностный сток, микроклиматическую циркуляцию воздуха и др.). Отдельно отметим, что курумам присущ особый тип почвообразования [Майзенберг, 1991], характерная флора и фауна [Алексеев, 2018] и заметная ресурсно-экологическая роль в традиционном хозяйстве местного населения [Medvedkov, 2013]. Совокупность перечисленных положений характеризует курумы как интересный объект для ландшафтного анализа.

Район исследования расположен на западе Среднесибирского плоскогорья, в пределах его низкого плато в нижней части бассейна реки Подкаменная Тунгуска. В административном отношении он находится на территории Эвенкийского муниципаль-

ного района Красноярского края. С точки зрения природно-географической зональности район представлен ландшафтами средней тайги и расположен в области спорадического развития многолетней мерзлоты.

На исследуемой территории курумовые ландшафты встречаются широко, занимая различные по крутизне и экспозиции склоны. В основном они приурочены к бортам долин малых и средних рек. Выходы скальных пород, на которых развиваются курумы, представлены обнажениями траппов и скарнов.

В качестве ключевых были выбраны два района исследования: «Алексис» (57 км²) и «Большая Черная» (540 км²), располагающиеся в бассейнах одноименных рек – притоков Подкаменной Тунгуски (рис. 1). Ключевые участки представляют собой типичные ландшафты низкого плато с плосковыпуклыми водоразделами под темнохвойной тайгой со значительной примесью мелколиственных пород и густой глубокой сетью эрозионного расчленения.

Тенденции изменения теплообеспеченности.

Климат района исследования характеризуется чертами переходного от умеренного континентального к умеренному резко-континентальному. Среднегодовые температуры воздуха по данным зональной гидрометеостанции (ЗГМО) «Бор» (рис. 2) слабо отрицательные и колеблются в среднем от –2 до –4°C, внутригодовые амплитуды достигают 37–42°C. Осадки отличаются большой неравномерностью во времени как по сезонам года, так и в многолетних интервалах. В среднем за год выпадает 450–650 мм, из них на теплый период (май–сентябрь) приходится 150–400 мм (около 60%). По данным ЗГМО «Бор», безморозный период продолжается 70–85 дней, средняя температура июля составляет 17–18°C, января – –23...–24°C.

Значения среднегодовых температур воздуха (по данным ЗГМО «Бор») фиксируют начало потепления климата с 1980-х гг., несмотря на сильно выраженную изменчивость по годам и десятилетиям (см. рис. 2). Данная ситуация отражена линией скользящего среднего: потепление 1990-х гг. сменилось стабилизацией и относительно (по сравнению с концом 1990-х гг.) слабым похолоданием 2000-х гг., а после 2010 г. вновь отмечается рост. Интегральная разностная кривая суммирует отклонения температур от средней и указывает на их явную тенденцию к росту в современный период (1991–2020 гг.). Наибольший вклад в увеличение температур воздуха за 1991–2020 гг. по сравнению с периодом климатической нормы 1961–1990 гг. вносят февральские (увеличение на 3,3°C) и мартовские (увеличение на 2,7°C) температуры воздуха, а также апрельские (на 2,2°C) и октябрьские (на 1,4°C). В целом среднего-

¹ Это каменные россыпи, которые полностью или частично лишены гольцового льда, что фиксируется по исчезновению подповерхностных холодных ручейков, отсутствию гольцового льда в межглыбовом пространстве, обилию глыб в неустойчивом положении и вогнутой в плане форме курума.

довая температура воздуха возросла на $1,3^{\circ}\text{C}$, а в 2019–2020 гг. перешла рубеж 0°C , что повторилось и в 2022 г.

Данные изменения температурного режима значительно влияют на теплообеспеченность ландшафтов. Для оценки происходящих изменений рассчитаны продолжительность вегетационного периода и суммы активных температур более 5°C и более 10°C в периоды 1961–1990 гг. (норма) и 1991–2020 гг. (современный). Сумма активных температур выше 10°C характеризует условия для развития древесной растительности. Эта сумма за период с 1991 по 2020 г. по сравнению с 1961–1990 гг. увеличилась в среднем на 166°C

и на 8 дней, достигнув 1600°C . Сумма активных температур воздуха выше 5°C определяет условия вегетации мхов и других растений напочвенного яруса, этот показатель также имеет положительную динамику: за 30 лет (с 1991 г.) рост на 164°C и на 8 дней. Период с температурами воздуха ниже 5°C – это часть года с пониженным функционированием биологической среды [Золотокрылин и др., 2012], а сумма температур ниже 0°C определяет «запасы холода», способствующие консервации состояния многолетней мерзлоты и мерзлотных ландшафтов. Так, по данным ЗГМО «Бор», «запасы холода» уменьшились за последние 30 лет на 311°C по сравнению с нормой 1961–1990 гг.

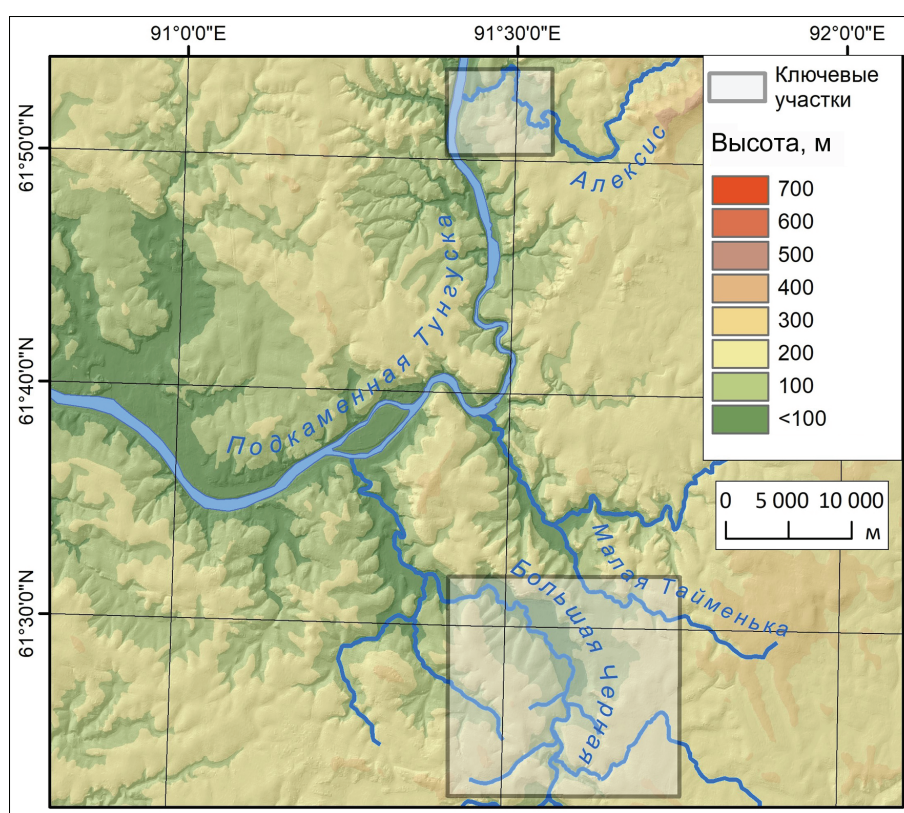


Рис. 1. Расположение ключевых районов исследования (именуются по названию рек, впадающих в р. Подкаменную Тунгуску)

Fig. 1. Location of key research areas (named after small rivers flowing into the Podkamennaya Tunguska River)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая схема работы с данными дистанционного зондирования представлена на рис. 3. На начальном этапе дешифрированы курумы и созданы маски их открытых частей. Затем в Google Earth Engine были подобраны подходящие снимки Landsat и Sentinel-2 и замаскированы облака, далее – рассчитаны индексы *NDVI* и *NDMI*, составлены композиты их максимальных показателей за период активной вегетации каждого года (т. е. каждому пикселю независимо присва-

ивались максимальные значения – для минимизации влияния облачности). Отдельно проводился анализ связи изменения значений *NDVI* и *NDMI* с морфометрическими характеристиками курумовых склонов.

Основным источником исходных данных для оценки изменений курумовых ландшафтов таежной зоны являлся архив космических снимков Landsat (разрешение 30 м), полученных со съемочных систем TM, ETM+ и OLI. Использовались сцены второго уровня обработки, который включает не

только радиометрическую и геометрическую, но и атмосферную коррекцию, т. е. значения космоснимков соответствуют отражению земной поверхности (Surface Reflectance), что позволяет не проводить дополнительную подготовку снимка при расчете вегетационных индексов. Обработка снимков осуществлялась с использованием облачной платформы Earth Engine, позволяющей производить работу с архивами снимков непосредственно на сервере. Для доступа к Earth Engine (Earth Engine JavaScript API) использовалась специализированная веб-среда (Code Editor), применяющая протоколы на языке Java. Отбор снимков производился по ключевым

районам исследования с учетом следующих критериев: минимальная облачность (<10%), даты съемки – с 01.07.1992 по 31.08.2023, месяцы – июль и август. Снимки с разных спутников Landsat были объединены в единую коллекцию изображений, при этом данные с Landsat OLI предварительно калибровались для сопоставления с предыдущими спутниками Landsat TM и ETM+ с использованием коэффициентов, предложенных в работе [Roy et al., 2016]. Для верификации дополнительно использовались снимки Sentinel-2, они также имеют второй уровень обработки, но отличаются более высоким пространственным разрешением (10 м).

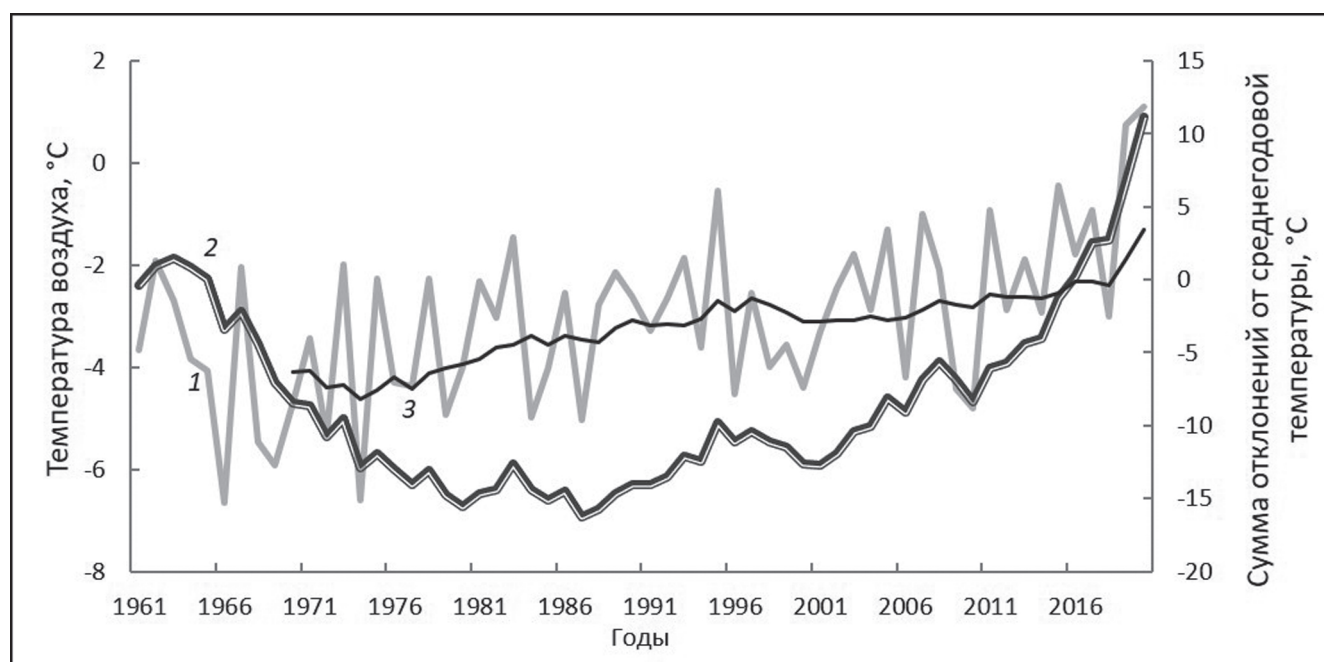


Рис. 2. Изменение температуры воздуха: 1 – среднегодовая температура воздуха; 2 – разностная интегральная кривая; 3 – 10-летнее скользящее среднее. Составлено по данным ЗГМО «Бор»

Fig. 2. Change in air temperature:

1 – Average annual air temperature; 2 – Difference integral curve; 3 – 10-year moving average. Compiled for the ZGMO "Bor"

Дешифрирование и составление базы данных курумов. На этапе дешифрирования составлялась база данных курумов по ключевым районам исследования. Отличительными признаками курумов являются: небольшая площадь открытой части склонов вытянутой формы, относительно высокая яркость и светлый тон на космических снимках, склоны с крутизной от 10°. Необходимо было отделить курумы от схожих по спектральным и морфологическим характеристикам болот, часто встречающимся в долинах рек, а также речных отмелей. Болота расположены на пойме, обычно близко к речному руслу. Для них характерны очень пологие поверхности и в основном они уже были отмечены на топокарте. В сложных случаях для уточнения

использовались космоснимки сверхвысокого разрешения (с сервисов Google и Yandex). Учитывая, что курумы приурочены к скальным выходам на крутых поверхностях и склонах средней экспозиции (это участки, где реки «прорезают» плотные породы), при отсутствии данных условий объект не считался курумом. Отмели располагаются в пределах русла и рядом с ним, отличаются высокой яркостью, поэтому они легко идентифицировались и не учитывались в исследовании. Кроме того, если площадь открытой части курума была недостаточно большой, такие участки также исключались из анализа. Выделение участков с курумами проводилось вручную по снимкам Sentinel-2 и топографическим картам, а при необходимости производилось уточ-

нение по снимкам сверхвысокого разрешения, находящимся в открытом доступе. В качестве эталонов использованы курумы, закартированные в ходе полевых исследований. В итоге были получены два полигональных слоя (по одному на каждый район исследования), состоящие из набора полигонов. В созданных слоях отображается очерчивание каждым полигоном местности, в пределах которой находится открытая часть склоновых поверхностей с курумами. Так, если склон существенно менял свою экспозицию, то для дальнейшего анализа создавал-

ся новый полигон. Всего для анализа был создан 41 полигон: 21 – для района «Большая Черная» и 20 – для района «Алексис» (рис. 4 и 5).

Далее внутри каждого полигона с использованием снимка Landsat-4 (14.07.1992) и снимка Sentinel-2 (09.08.2020) проведена классификация с обучением для выделения двух классов: «лес» и «открытый курум». Классу «лес» присваивались значения NoData, что позволило попиксельно выделить открытые части курумов для проведения дальнейшего анализа. Полученные растры векторизовались.

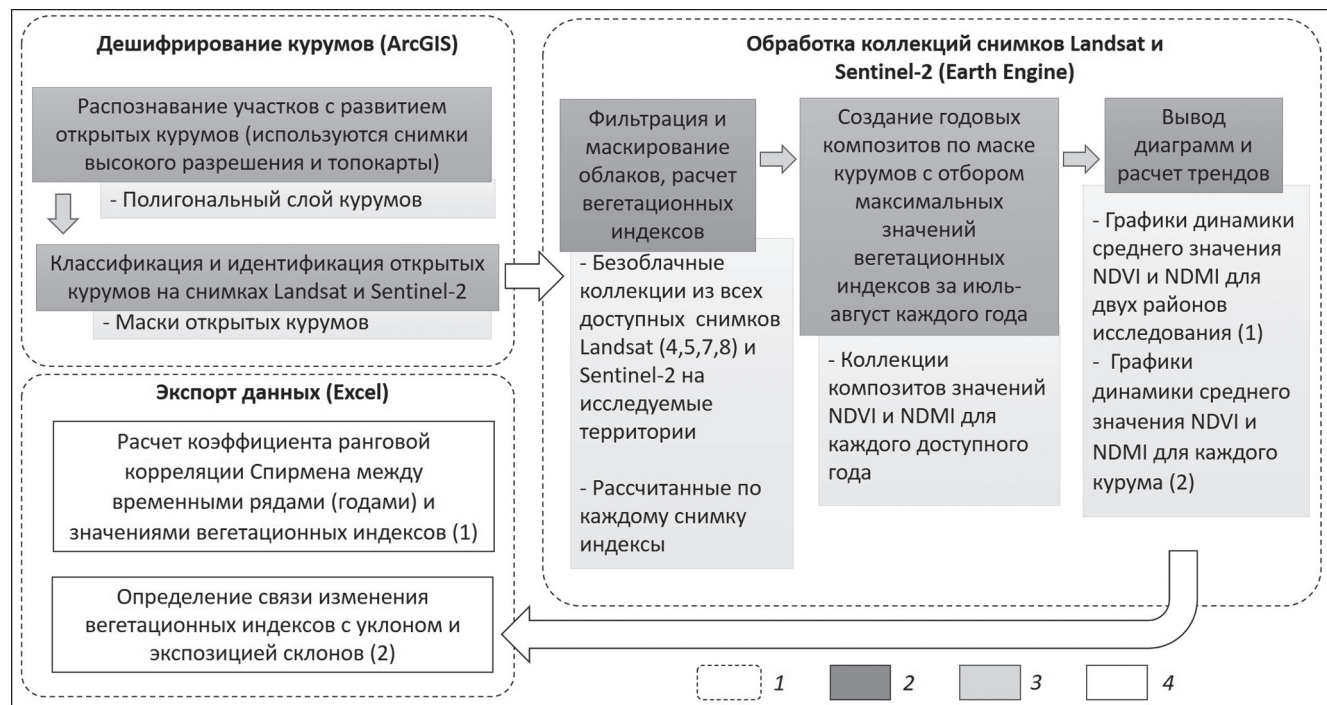


Рис. 3. Алгоритм исследования: 1 – основные этапы; 2 – описание процедуры; 3 – результат выполнения процедуры; 4 – итоговые результаты

Fig. 3. Algorithm of the study: 1 – the main stages; 2 – description of the procedure; 3 – the result of the procedure; 4 – final results

С целью проведения морфометрического анализа по топографической карте с масштабом 1 : 100 000 были оцифрованы горизонтали, по которым с использованием слоя рек проинтерполирована земная поверхность (инструмент TopoRaster в ArcGIS). Была получена цифровая модель рельефа, которая использовалась для расчета средних уклонов и экспозиции каждого участка анализируемого курума.

Обработка снимков в Earth Engine. После фильтрации всех снимков из архива Landsat, маскирования облаков и объединения их в единую коллекцию были рассчитаны индексы *NDVI* и *NDMI*. Индекс *NDVI* является показателем фотосинтетически активной фитомассы, которая напрямую связана с густотой растительного покрова. Он рассчитывается по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где *RED* – красный (0,63–0,69), *NIR* – ближний инфракрасный (0,77–0,89) каналы.

Индекс *NDMI* рассчитывается на основе среднего инфракрасного канала, который чувствителен к содержанию влаги в листьях, поэтому позволяет оценивать увлажнение растительного покрова. *NDMI* рассчитывается по формуле:

$$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR), \quad (2)$$

где *SWIR* – средний инфракрасный канал (1,5–1,7 мкм).

Оба индекса нормализованные, что позволяет сравнивать их значения за разные годы. Показатели рассчитывались по каждому снимку,

затем из снимков одного вегетационного сезона (июль–август) составлялся композит максимальных значений используемых индексов. Этот подход широко используется при анализе динамики *NDVI* для удаления остаточного влияния облачности, снижающей значения данного индекса. Затем значения индексов усреднялись с использованием векторизованной маски открытых частей курумов,

полученной при их дешифрировании и классификации на предыдущем этапе. Так были получены осредненные максимальные значения по каждому участку курумов за каждый анализируемый год. Затем значения данного года усреднялись по всем курумам исследуемого района. Все временные ряды были экспортированы в MS Excel для их дальнейшего анализа.

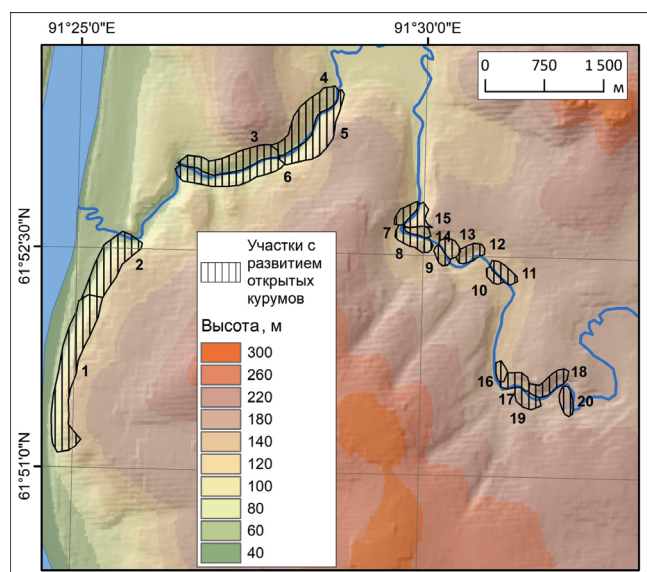


Рис. 4. Расположение изучаемых курумов в районе исследования «Алексис»

Fig. 4. Location of studied kurums in the area of the “Alexis” study

Для определения устойчивости трендов изменения индексов их годовые ряды и сами годы были ранжированы по порядку. Далее между ними был рассчитан ранговый коэффициент корреляции Спирмена. Если в каждый следующий период (в данном случае год) ранг значения больше предыдущего, то ряд устойчиво растет и его коэффициент равен 1, в случае уменьшения значений ряда отмечается отрицательная тенденция, при 0 – нет устойчивой тенденции.

Таким образом, по разнице значений 1992 и 2023 гг. рассчитано изменение вегетационных индексов за 32 года ($\Delta NDVI$ и $\Delta NDMI$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфометрические параметры курумов. Значительная часть дешифрированных курумов занимает склоны юго-западной и южной экспозиций (около 40%), очень редко (менее 10% от общего количества) каменистые россыпи отмечаются на склонах, обращенных на север и восток. Исследуемые курумы располагаются на склонах с разной

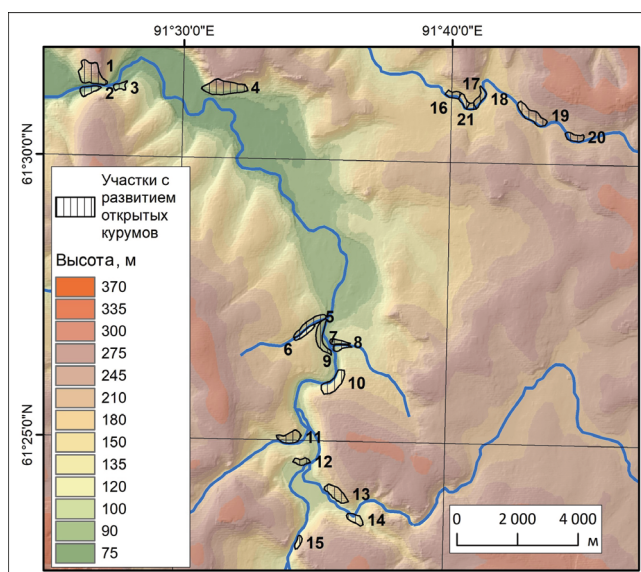


Рис. 5. Расположение изучаемых курумов в районе исследования «Большая Черная»

Fig. 5. Location of studied kurums in the area of the “Big Black” study

крутизной (от 5 до 22°), в среднем – около 11° ($\pm 4^\circ$). Курумы района «Алексис» встречаются на несколько более низких гипсометрических позициях (50–150 м) в сравнении с грубообломочными накоплениями района «Большая Черная» (70–180 м). Размер курумовых «островов» колеблется от 900 до 151 тыс. км² (медиана по району «Большая Черная» – 3600 м², а по району «Алексис» – 4500 м²) (табл. 1). Данные значения относятся к открытой части курумов (т. е. той, которая была определена как курум в ходе классификации). В реальности открытые курумы имеют размытые границы, к тому же они постепенно переходят в «закрытые» (т. е. заросшие), простираясь далее под лесным пологом.

Соотношение динамики *NDVI* и *NDMI* для индикации изменений. Использование *NDVI* для целей ландшафтной индикации климатических изменений широко распространено в мировой практике. Так, в ряде работ зарубежных ученых [Ichii et al., 2002; Jia et al., 2009; Ju, Masek, 2016; Housset et al., 2019] отмечена связь между ростом *NDVI* и увеличением среднегодовых температур воздуха в северных широтах. К подобным же вы-

водам приходят и российские ученые [Кравцова, Лошкарева, 2013; Тишков и др., 2016; Цепелев и др., 2015; Титкова, Виноградова, 2019; Высоцкая, Медведков, 2022]. Тенденции изменения *NDVI* в большинстве случаев сопровождаются ростом альбедо, что свидетельствует об увеличении лесистости территорий.

Учитывая важную роль мхов в процессе зарастания курумов, необходимо оценить их вклад в изменение значений *NDVI* при разных условиях увлажнения. В данном отношении мы опираемся на одно из исследований [May, Parker, Ungeret, 2018], в котором проанализирована роль мхов в изменении

значений *NDVI* в увязке с динамикой наземного увлажнения и величиной первичной продукции. Отмечена важная особенность, что на значения *NDVI* в районах преимущественного развития мхов сильно влияет степень их увлажнения. Это проявляется в следующем виде: при высыхании мхов *NDVI* снижается, а сразу после намокания снова достигает значений, близких к начальным, хотя первичная продукция при этом не меняется. Такого эффекта не отмечено для сосудистых растений, так как они всегда имеют внутренний запас воды, поэтому значения *NDVI* и первичной продукции в данном случае имеют прямую связь [May et al., 2018].

Таблица 1

Основные морфометрические характеристики курумов в двух районах исследования

Район исследования	Абсолютная высота, м	Площадь, тыс. м ²	Крутизна, град.	Преобладающая экспозиция
«Алексис»	50–150	<20 и 60–150	7–17	Юго-запад, запад
«Большая Черная»	70–180	<50	5–21	Юг, юго-запад

В связи с отмеченной ролью увлажнения мхов в колебаниях значений *NDVI*, нами для курумов исследуемых районов были сопоставлены показатели *NDVI* и *NDMI*. Полученный результат показывает прямую корреляционную зависимость между вегетационными индексами: для района «Алексис» – $R^2 = 0,93$ и для района «Большая Черная» – $R^2 = 0,488$. Эти результаты позволяют сделать предположение о не столь значимой роли мхов в формировании спектральных характеристик курумовых ландшафтов района «Алексис», естественно, в сравнении с курумами района «Большая Черная».

В данной работе анализируются оба вегетационных индекса (*NDVI* и *NDMI*), они широко используются для оценки биофизической специфики подстилающей поверхности [Wilson, Sader, 2002]. Повышение значений *NDVI* интерпретируется нами как рост продуктивности вегетирующей растительности за счет увеличения площади и мощности мохово-лишайникового покрова, а также развития древесного подроста. Высокие значения *NDMI* могут подтвердить наличие в поверхностном слое курума влаги, необходимой для регенерации гольцового льда и возобновления курумодесерпции. Рассчитав изменения вегетационных индексов для курумов исследуемых районов, можно выявить те из них, которые характеризуются наибольшим приростом фитомассы. Соответственно, такие курумы и представляют наибольший интерес с точки зрения исследования феномена потенциальной аградации многолетней мерзлоты в условиях потепления климата.

Анализ пространственно-временных особенностей динамики *NDVI* и *NDMI*. Для описания динамики значений индексов, осредненных по курумам ключевых районов, используется линейный тренд, так как это наиболее простая функция, отражающая тенденцию происходящих изменений.

NDVI. В пространственном отношении изменение индекса *NDVI* характеризуется неравномерностью, что проявляется не только в масштабе ключевых районов исследования (рис. 6), но и в пределах отдельных курумов. Так, в границах одного и того же курума $\Delta NDVI$ (разница значений между 1992 и 2023 гг.) может варьировать от +0,07 до +0,16, что свидетельствует о «пятнистом» характере их зарастания.

На более мелкомасштабном уровне изменения имеют иной характер. Так, в районе «Алексис» среднее значение *NDVI* несколько меньше, и $\Delta NDVI$ (разница значений между 1992 и 2023 гг.) менее выражена по сравнению с районом «Большая Черная». Ряд значений *NDVI* по курумовым ландшафтам района «Алексис» аппроксимируется прямой с коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,819$), $\Delta NDVI$ достигает +0,173. Тогда как для курумовых геосистем района «Большая Черная» коэффициент ниже ($R^2 = 0,716$), и $\Delta NDVI$ также менее выражена, составляя +0,111 (см. рис. 5). Среднемноголетнее изменение *NDVI* по курумам района «Алексис» составляет +0,054 за 10 лет, по району «Большая Черная» +0,035 за 10 лет, что сопоставимо с тенденциями «позеленения» тундровых, лесотундровых и северотаежных ландшафтов в Средней Сибири [Титкова, Виноградова, 2019]. Полученные значения, со-

гласно данным повторных полевых исследований, свидетельствуют об увеличении площадного покрытия мхов, кустарников и подроста из мелколиственных пород древостоя [Медведков, 2016; 2018].

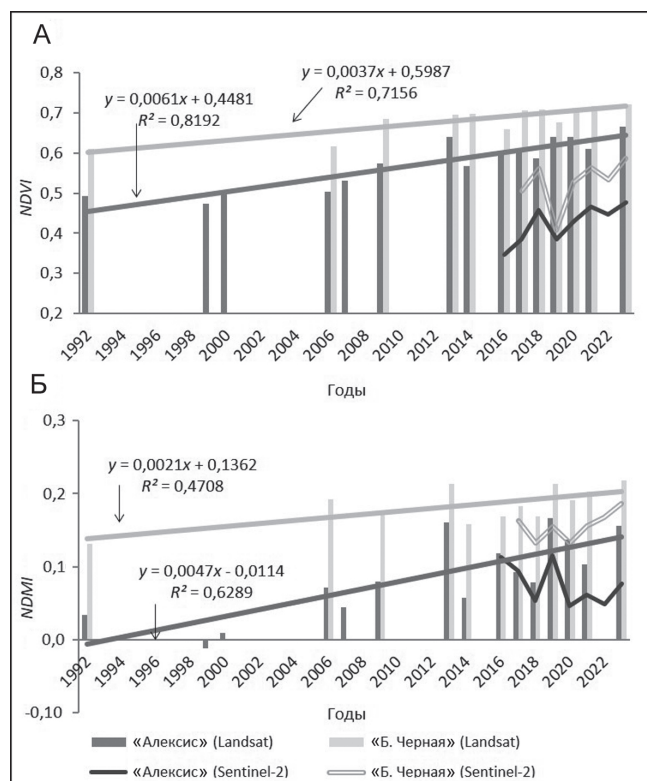


Рис. 6. Межгодовая динамика индексов:
А – *NDVI*; Б – *NDMI*

Fig. 6. The interannual dynamics of *NDVI* (A) and *NDMI* (B) indices

NDMI. Изменение *NDMI*, как и *NDVI*, характеризуется пространственно-временной неоднородностью, в общих чертах схожей с картиной по *NDVI*. В целом с начала исследуемого периода (с 1992 г.) отмечается тенденция к увеличению значений *NDMI* по районам развития курумных ландшафтов (см. рис. 6). Так, для района «Алексис» увеличение *NDMI* составляет в среднем +0,038 за 10 лет, $R^2 = 0,628$, а изменения индекса в бассейне р. Большой Черной более стагнирующие: увеличение *NDMI* составляет в среднем +0,027 за 10 лет, $R^2 = 0,471$. При этом заметим, что значения *NDMI* в районе «Алексис» в среднем ниже, чем на каменистых россыпях района «Большая Черная», что, по-видимому, обусловлено их большей залесенностью в бассейне р. Большой Черной.

Для верификации рядов, полученных при работе со снимками Landsat TM, аналогичные расчеты выполнены и по снимкам Sentinel-2. Они охватывают гораздо более короткий период (с 2016–2017 гг.), но имеют более высокое пространственное раз-

решение, что позволяет точнее оценить тенденции зарастания открытых курумов. Рассчитанные по снимкам Sentinel-2 значения *NDVI* и *NDMI* для района «Большая Черная» хорошо коррелируют со значениями, полученными по снимкам Landsat TM ($R = 0,961$ и $R = 0,681$), но при этом аналогичные характеристики для района «Алексис» показывают слабую корреляцию ($R = 0,32$ и $R = 0,35$). Отметим, что значения индексов, рассчитанных по снимкам Sentinel-2, в обоих случаях несколько ниже показателей, полученных с использованием архива космоснимков Landsat. Данная особенность объясняется лучшей идентификацией открытых частей склонов, произведенной по снимкам Sentinel-2. Не столь высокая корреляция по району «Алексис», по-видимому, связана с тем, что в первый год, когда была доступна съемка с Sentinel-2 (2016 г.), облака закрывали большую часть данной территории. Тем не менее для двух районов исследования отмечается тенденция к росту значений *NDVI* как по данным, полученным при обработке снимков Landsat TM, так и Sentinel-2. По *NDMI* отмечается менее выраженный рост значений, что особенно заметно по результатам обработки снимков Sentinel-2.

Несмотря на выраженный рост анализируемых значений вегетационных индексов, следует отметить колебательный характер их динамики (см. рис. 6). Данная особенность может быть объяснена соответствующим «поведением» прироста мхов, обусловленного погодными колебаниями на протяжении всего вегетационного периода. Так, например, наибольший линейный прирост у сфагновых мхов, произрастающих в карельской тайге, отмечен в вегетационные периоды с теплой весной и теплым влажным летом [Grabovik, Nazarova, 2013], а в хибинской тайге отмечаются схожие тенденции прироста у зеленых мхов – максимальная скорость их роста фиксировалась при достаточном увлажнении при температуре теплого периода от 11 до 17°C [Ermolaeva et al., 2013]. Таким образом, не только прирост тепла, о котором говорилось выше, является фактором роста фитомассы мхов, но и вариабельность увлажнения на протяжении вегетационного периода также оказывает заметное влияние на динамику биопродукционного процесса и его характер.

При анализе пространственного распределения значений вегетационных индексов учитывалась крутизна склоновых поверхностей и их экспозиция (рис. 7). Роль крутизны склоновых поверхностей в динамике вегетационных индексов явно не выражена (см. рис. 7Б). Возможно, это связано с тем, что исследуемые курумы мало отличаются по крутизне, так как на пологих склонах они не получают развития. Роль экспозиционного фактора проявляется

в более выраженных положительных изменениях $NDVI$ на склонах, обращенных на север и северо-восток, где курумовые ландшафты более чувствительны к росту теплообеспеченности (см. рис. 7А). При этом следует отметить, что на начало исследуемого периода (1992 г.) курумы западной и се-

ро-западной экспозиций отличались наименьшими значениями $NDVI$, т. е. находились на более ранних стадиях зарастания. Наибольшие изменения $NDMI$ характерны для курумов, расположенных на склонах северной, отчасти – северо-западной и юго-западной экспозиций (см. рис. 7А).

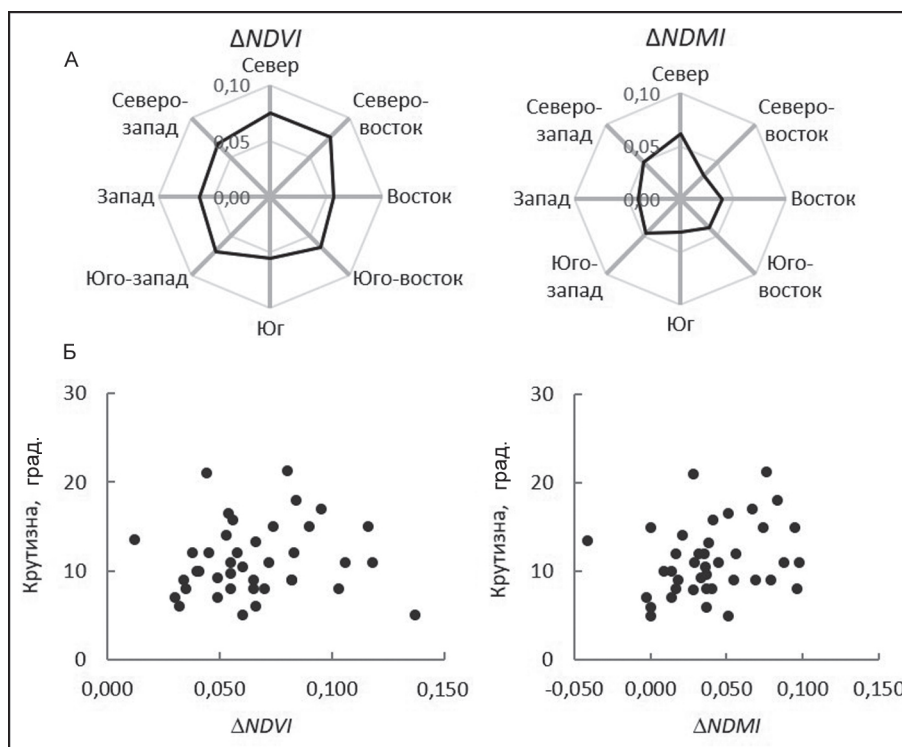


Рис. 7. Зависимость $NDVI$ и $NDMI$ от экспозиции (А) и крутизны (Б) склонов, на которых расположены курумы
Fig. 7. Dependence of $NDVI$ and $NDMI$ on the exposure (А) and steepness (Б) of the slopes on which the kurums are located

Общая корреляция между положительной динамикой обоих индексов высокая ($R = 0,930$). На курумах района «Алексис» отмечается высокая степень корреляционной зависимости ($R = 0,930$), на курумах района «Большая Черная» она проявляется меньше ($R = 0,48$). Таким образом, динамика значений вегетационных индексов ($NDVI$ и $NDMI$) позволяет выявить наиболее и наименее откликающиеся на климатические изменения курумы.

Типизация курумов по скорости изменений. В зависимости от характера динамики вегетационных индексов все курумы были разделены на три группы (табл. 2): с максимальным приростом обоих индексов ($\Delta NDVI > 0,15$; $\Delta NDMI > 0,1$); со средними значениями положительной динамики или ярко выраженным откликом одного из индексов и с минимальным приростом обоих индексов ($\Delta NDVI < 0,1$; $\Delta NDMI < 0,05$).

Практически всю первую группу составляют глыбовники района «Алексис», в основном совсем небольшие по площади каменистые россыпи. Высокая скорость их зарастания, вероятно, объясня-

ется тем, что оно началось позже, чем на курумах Большой Черной. Увеличение $NDMI$ на склонах «холодных» экспозиций может быть связано с активным нарастанием сфагновых мхов, скорость роста которых достигает 8–9 мм/год [Гончарова, 2005], что наблюдается в условиях повышенного наземного увлажнения.

Курумы второй группы весьма неоднородны. В нее входят те курумовые ландшафты, которые характеризуются средними значениями обоих вегетационных индексов или имеют выраженные изменения только по одному из них.

Курумы третьей группы – это те глыбовники, которые в течение исследуемого периода практически не меняли своего состояния. Они встречаются в пределах района «Алексис» и на территории района «Большая Черная». Более $\frac{2}{3}$ курумов из данной категории располагаются на склонах южной, юго-западной и юго-восточной экспозиций. Вероятно, часть из них уже перешла в стабильное (реликтовое) состояние.

Механизм трансформации. Представляется, что процесс зарастания курумов в условиях потепления климата развивается следующим образом. В основании курума вытаивает гольцовый лед, вызывая ослабление курумодесерпции и суффозии. В дальнейшем это способствует кольматации межглыбового пространства курума и созданию условий для закрепления растений. На кольматированной мелкоземом поверхности курума поселяются не только лишайники, мхи, способствующие формированию органогенного горизонта, но и мелколиственные породы – чаще береза, иногда с примесью рябины, в нижних частях склонов – ива. Отмечено, что в местах скопления лишайников скорость накопления мелкозема выше, по-видимому, за счет более интенсивного биохимического выветривания. Далее развивается процесс почвообразования, в результате чего курумоземы переходят в маломощные скелетные буротаежные почвы. Отдельные разоб-

щенные участки почвенно-растительного покрова сливаются в единое образование и постепенно формируется мощный теплоизолирующий торфопрастительный слой. При этом, зачастую увеличивается и доля сфагновых мхов. Почва становится торфянистой и/или торфяной. Конечной стадией становится переход курума в «висячее» болото [Медведков, 2016]. Данный процесс способствует накоплению влаги в куруме, что может приводить к новообразованию гольцового льда.

Сегодня курумы находятся на различных стадиях зарастания «позеленения»: часть из них начала зарастать раньше исследуемого периода и уже не отличается от залесенных территорий на космоснимках, а другая часть находится на начальной стадии зарастания. Несмотря на указанную дифференциацию, общий тренд «позеленения» курумов имеет сходные черты, это фиксируется по материалам космосъемки и подтверждается данными повторных наземных наблюдений.

Таблица 2
Группы курумов, различающиеся по реакции растительности на потепление климата

Группа по динамики значений	$\Delta NDVI$	$\Delta NDMI$	Преобладающая экспозиция	Номера курумов (рис. 4 и 5)	Кол-во курумов
Максимальные (1-я группа)	$>0,15$	$>0,11$	Юго-запад и северо-запад	«Алексис»: 1, 2, 6, 7, 10, 11, 18, 20; «Большая Черная»: 5, 6, 21	11
Средние (2-я группа)	$0,1-0,15$	$0,01-0,11$	Юго-запад, юг, северо-запад	«Алексис»: 5, 9, 15–17; «Большая Черная»: 1–3, 5, 7, 8, 10, 14–20	19
Минимальные (3-я группа)	$<0,1$	$<0,005$	Юго-запад, юго-восток, юг	«Алексис»: 3, 4, 8, 12–14, 19; «Большая Черная»: 4, 9, 10–13	13

ВЫВОДЫ

Для оценки «позеленения» курумowych ландшафтов рассчитаны вегетационные индексы *NDVI* и *NDMI* (для 49 курумов). Динамика данных индексов с 1992 по 2023 г. (за 32 года) не только подтверждает, но и позволяет экстраполировать выводы, полученные по результатам полевых исследований на более значительную территорию. Пространственная картина изменения вегетационных индексов позволила оценить неоднородность зарастания курумов на значительных по площади территориях. Так, наиболее выраженные положительные изменения индекса *NDVI* характерны для курумов северной, северо-восточной, в несколько меньшей степени – северо-западной, западной и юго-западной экспозиций, *NDMI* – для северной, в несколько меньшей степени – северо-западной и юго-западной экспозиций. Влияние крутизны склонов в явном виде не выражено.

Изменение значений вегетационных индексов за рассматриваемый период описывается линейной функцией. Среднее изменение значений *NDVI* для курумов района «Алексис» составляет +0,198, что соответствует тренду +0,061 за 10 лет, по району «Большая Черная» среднее изменение индекса *NDVI* составляет +0,101 с трендом +0,031 за 10 лет. Среднее изменение *NDMI* по курумам «Алексиса» составляет +0,016 и +0,051 за 10 лет, по курумам «Большой Черной» динамика *NDMI* также имеет слабую тенденцию к росту: +0,065 и +0,020 за 10 лет.

В зависимости от характера динамики вегетационных индексов, все курумы были разделены на три группы: с максимальным приростом обоих индексов ($\Delta NDVI > 0,15$; $\Delta NDMI > 0,1$) – 28 курумов; со средними значениями обоих вегетационных индексов или с выраженными изменения по одному из них – 22 курума и с минимальным приростом обоих индексов ($\Delta NDVI < 0,1$; $\Delta NDMI < 0,01$) – 16 курумов.

Несмотря на выявленную дифференциацию, зарастание каменистых россыпей на каждом из участков имеет пятнистую структуру, что свидетельствует о высокой мозаичности процесса «позеленения» на локальном уровне.

Курумовые склоны, характеризующиеся наибольшим приростом значений вегетационных индексов, представляют значительный интерес с точки зрения исследования феномена аградации гольцового льда в условиях прогрессирующего потепления климата.

Результаты полевых исследований показывают, что к числу наиболее выраженных признаков климатогенного изменения курумовых ландшафтов отно-

сятся: вытаивание гольцового льда в межглыбовом пространстве курумов, формирование вогнутого профиля курумового склона с наличием отдельных провалов, увеличение площади лишайникового покрова на глыбовой поверхности каменистых россыпей и их зарастание мелколиственным лесом. Представляется, что индикация данных изменений возможна с использованием вегетационных индексов. Полученные с использованием дистанционных и полевых данных результаты, позволяют говорить о переходе курумовых ландшафтов исследуемой территории в состояния, более характерные для южной тайги, что подтверждает изменение зонально-ландшафтных условий.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-77-00048 (<https://rscf.ru/project/21-77-00048/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.Р. Курумы – феномен криосферы // Наука и техника в Якутии. 2018. № 2. С. 72–88.
- Высоцкая А.А., Медведков А.А. Климатогенное «позеленение» курумовых ландшафтов в долине нижнего течения реки Подкаменная Тунгуска // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28. № 1. С. 305–313. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313.
- Гончарова И.А. К вопросу о структуре дерновины и продуктивности сфагновых мхов на олиготрофных болотах // Сибирский экологический журнал. 2005. № 1. С. 131–134.
- Горишков С.П. Климат, мерзлота и ландшафты Средне-енисейского региона. М.: МГУ, 2003. 81 с.
- Железняк И.И., Мальчикова И.Ю., Шполянская Н.А. и др. Курумы Северного Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1992. 182 с.
- Золотокрылин А.Н., Кренке А.Н., Виноградова В.В. Районирование России по природным условиям жизни населения. М.: ГЕОС, 2012. 156 с.
- Кравцова В.И., Лошкарева А.Р. Динамика растительности экотона тундра–тайга на Кольском полуострове в связи с климатическими колебаниями // Экология. 2013. № 4. С. 1–9. DOI: 10.7868/S0367059713040082.
- Майценберг М.С. Почвообразование на курумах (на примере Сихотэ-Алиня): автореф. дис. ... канд. биол. наук: М., 1991. 25 с.
- Медведков А.А. Геоэкологический отклик среднетаежных ландшафтов Приенисейской Сибири на потепление климата конца XX – начала XXI века // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. № 6. С. 541–552.
- Медведков А.А. Как глобальное потепление меняет природу сибирской тайги? // Природа. 2016. № 12 (1216). С. 40–47.
- Медведков А.А. Климатогенная динамика ландшафтов сибирской тайги в бассейне Среднего Енисея // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 122–129. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2018-4(122-129).
- Туткова Т.Б., Виноградова В.В. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 310–323. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323.
- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Вайсфельд М.А. и др. «Позеленение» ландшафтов Арктики как следствие современных климатогенных и антропогенных трендов растительности // Известия Русского географического общества. 2016. Т. 148. № 3. С. 14–24.
- Целев В.Ю., Паниди Е.А., Торлопова Н.В. и др. Использование характеристик растительного покрова таежной зоны для мониторинга климатических изменений XXI в. // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 40. С. 221–235.
- Ermolaeva O.V., Shmakova N.Yu., Lukyanova L.M. On the growth of Polytrichum, Pleurozium and Hylocomium in the forest belt of the Khibiny Mountains, *Arctoa*, 2013, vol. 22, p. 7–14.
- Grabovik S.I., Nazarova L.E. Linear increment of Sphagnum mosses on Karelian mires (Russia), *Arctoa*, 2013, vol. 22, p. 23–26.
- Housset J., Dedieu J.-P., Lévesque E. et al. Greening dynamics of vegetation in the high latitudes: case study of the George River basin (Nunavik, Canada) from 1985–2015 Landsat data, *Geophysical Research Abstracts*, 2019, no. 21, p. 1–1.
- Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990, *International Journal of Remote Sensing*, 2002, no. 23, p. 3873–3878, DOI: 10.1080/01431160110119416.
- Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming, *Journal of Environmental Monitoring*, 2009, no. 11, p. 2231–2238, DOI: 10.1039/b911677j.
- Ju J., Masek J.G. The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, no. 176, p. 1–16, DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.001.
- May J.L., Parker T., Ungeret S. Short term changes in moisture content drive strong changes in Normalized Difference

- Vegetation Index and gross primary productivity in four Arctic moss communities, *Remote Sensing of Environment*, 2018, no. 3, p. 114–120, DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.041.
- Medvedkov A.A. Response of middle-taiga permafrost landscapes of Central Siberia to global warming in the late 20th and early 21st centuries, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 48, 012009, DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012009.
- Medvedkov A.A. The Kets ethnos and its “feeding landscape”: ecological-geographical and socio-ecological problems under globalization and changing climate, *Geography, Environment, Sustainability*, 2013, vol. 6, no. 3, p. 108–118, DOI: 10.24057/2071-9388-2013-6-3-108-118.
- Roy D., Kovalsky V., Zhang H. et al. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 185, DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.024.
- Wilson E.H., Sader S.A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2002, no. 3, p. 385–396, DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00318-2.

Поступила в редакцию 03.05.2023

После доработки 16.01.2024

Принята к публикации 24.04.2024

CLIMATE-DRIVEN CHANGES OF KURUM LANDSCAPES IN THE WEST OF THE CENTRAL SIBERIAN PLATEAU WITHIN THE MIDDLE TAIGA ZONE

A.A. Vysotskaya¹, A.A. Medvedkov²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Department of Physical Geography of the World and Geoecology

¹ Postgraduate student; e-mail: an.vys@yandex.ru

² Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: a-medvedkov@bk.ru

The change of bioproduction indicators on the kurum slopes of the western part of the Central Siberian Plateau under the modern climate warming is considered. The change in heat availability over the period from 1991 to 2020 was estimated in comparison to 1961–1990, and an increase in the sum of active air temperatures above 5°C and 10°C was noted by an average of 165°C and 8 days for both cases. The kurum slopes in the study areas were identified based on the processing of remote sensing data (satellite images of the Landsat series with 30-meter resolution and the Sentinel-2 with 10-meter resolution). The vegetation index series (NDVI and NDMI) were calculated for them using the archives of these images. This made it possible to assess the dynamics of photosynthetically active phytomass and moistening of the ground cover from 1992 to 2023. The index values were calculated as the maximum for the growing season (July–August) of the analyzed year for all low-cloud Landsat and Sentinel-2 scenes available for observation. In general, the interannual change in the NDVI and NDMI values averaged over the analyzed kurums tends to increase. There is a positive dynamic in the fluctuations of both vegetation indices during the study period. The kurum landscapes were typified by the rate of their overgrowth, kurums with the largest, average and smallest difference of the obtained values were identified, and their spatial distribution was estimated. The role of morphometric characteristics of slopes (including their exposure) in the processes of kurum overgrowth was analyzed. It was revealed that the maximum values of the growth of vegetation indices correspond to the slopes of cold exposures (northern, north-western and eastern), while the influence of steepness is insignificant. The positive dynamics of the values of vegetation indices allows suggesting the “greening” of kurum landscapes, which is also confirmed by the results of repeated studies at the key sites. The overgrowth of kurums includes the increase in the area and height of moss-lichen cover, the appearance of shrubs, the active growth of young small-leaved trees and rare undergrowth of conifers. The “greening” of kurum slopes is accompanied by the melting of the char ice, therefore, the middle taiga kurums of the Central Siberian Plateau become more characteristic of the southern taiga, which indicates a change in zonal landscape conditions in the areas of their occurrence.

Keywords: periglacial environments, rock glaciers, global climate warming, remote sensing data, spectral characteristics, vegetation changes, permafrost degradation, Yenisei Siberia

Acknowledgment: The study was financially supported of the Russian Science Foundation (project no. 21-77-00048, <https://rscf.ru/project/21-77-00048/>).

REFERENCES

- Alekseev V.R. Kurumy – fenomen kriosfery [Kurums as a phenomenon of the cryosphere], *Nauka i tekhnika v Jakutii*, 2018, no. 2, p. 72–88. (In Russian)
- Cepelev V.Ju., Panidi E.A., Torlopova N.V. et al. Ispol'zovanie harakteristik rastitel'nogo pokrova taezhnoj zony dlja monitoringa klimaticheskikh izmenenij XXI v. [Using the cha-

- racteristics of vegetation cover of the taiga zone for monitoring climate change in the 21st century], *Uchenye zapiski rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2015, no. 40, p. 221–235. (In Russian)
- Ermolaeva O.V., Shmakova N.Yu., Lukyanova L.M. On the growth of Polytrichum, Pleurozium and Hylocomium in the forest belt of the Khibiny Mountains, *Arctoa*, 2013, vol. 22, p. 7–14.
- Goncharova I.A. K voprosu o strukture dernoviny i produktivnosti sfagnovykh mхов na oligotrofnых болотah [On the structure of turf and productivity of sphagnum mosses in oligotrophic swamps], *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2005, no. 1, p. 131–134. (In Russian)
- Gorshkov S.P., Vandenberg G., Alekseev B.A. *Climate, permafrost and landscapes of the middle Yenisei region*, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2003, 81 p.
- Grabovik S.I., Nazarova L.E. Linear increment of Sphagnum mosses on Karelian mires (Russia), *Arctoa*, 2013, vol. 22, p. 23–26.
- Housset J., Dedieu J.-P., Lévesque E. et al. Greening dynamics of vegetation in the high latitudes: case study of the George River basin (Nunavik, Canada) from 1985–2015 Landsat data, *Geophysical Research Abstracts*, 2019, vol. 21, p. 1–1.
- Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990, *International Journal of Remote Sensing*, 2002, vol. 23, no. 18, p. 3873–3878, DOI: 10.1080/01431160110119416.
- Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming, *Journal of Environmental Monitoring*, 2009, vol. 11, p. 2231–2238, DOI: 10.1039/b911677j.
- Ju J., Masek J.G. The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 176, p. 1–16, DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.001.
- Kravcova V.I., Loshkareva A.R. Dynamics of vegetation in the tundra-taiga ecotone on the Kola peninsula depending on climate fluctuations, *Russian journal of ecology*, 2013, no. 4, p. 1–9, DOI: 10.7868/S0367059713040082.
- Majzenberg M.S. *Pochvoobrazovanie na kurumah (na primere Sihote-Alinja)* [Soil formation on kurums (case study of the Sikhote-Alin Mountains)], Extended Abstract of PhD Thesis in biology, Moscow, 1991, 25 p. (In Russian)
- May J.L., Parker T., Ungeret S. Short term changes in moisture content drive strong changes in Normalized Difference Vegetation Index and gross primary productivity in four Arctic moss communities, *Remote Sensing of Environment*, 2018, vol. 212, p. 114–120, DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.041.
- Medvedkov A.A. Geoekologicheskij otklik srednetaezhnykh landshaftov Prienisejskoj Sibiri na poteplenie klimata konca XX – nachala XXI veka [Geoenvironmental Response of the Mid-Taiga Landscapes of Yenisei Siberia to Global Warming during Late 20th – Early 21st Centuries], *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2014, no. 6, p. 541–552. (In Russian)
- Medvedkov A.A. Kak global'noe poteplenie menyaet prirodu sibirskoj tajgi? [How does the global warming change the nature of the Siberian taiga?], *Priroda*, 2016, no. 12(1216), p. 40–47. (In Russian)
- Medvedkov A.A. Klimatogennaja dinamika landshaftov sibirskoj tajgi v bassejne Srednego Eniseja [Climatogenic dynamics of Siberian taiga landscapes in the middle Yenisei River basin], *Geografija i prirodnye resursy*, 2018, no. 4, p. 122–129, DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2018-4(122-129). (In Russian)
- Medvedkov A.A. Response of middle-taiga permafrost landscapes of Central Siberia to global warming in the late 20th and early 21st centuries, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 48, 012009, DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012009.
- Medvedkov A.A. The Kets ethnos and its “feeding landscape”: ecological-geographical and socio-ecological problems under globalization and changing climate, *Geography, Environment, Sustainability*, 2013, vol. 6, no. 3, p. 108–118, DOI: 10.24057/2071-9388-2013-6-3-108-118.
- Roy D., Kovalsky V., Zhang H. et al. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 185, DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.024.
- Tishkov A.A., Belonovskaja E.A., Vajsfel'd M.A. et al. “Pozeleenenie” landshaftov Arktiki kak sledstvie sovremennykh klimatogennykh i antropogennykh trendov rastitel'nosti [“Greening” of the Arctic landscape as a result of modern climate-caused and anthropogenic trends of vegetation cover], *Izvestija Russkogo geograficheskogo obshhestva*, 2016, vol. 148, no. 3, p. 14–24. (In Russian)
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. Izmenenija klimata v perehodnykh prirodnykh zonah severa Rossii i ih pojavlenie v spektral'nykh harakteristikah landshaftov [Climate changes in transitional natural areas of Russian northern regions and their display in landscape spectral characteristics], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 5, p. 310–323, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323. (In Russian)
- Vysotskaya A.A., Medvedkov A.A. Klimatogennoe “pozeleenenie” kurumovykh landshaftov v doline nizhnego techenija reki Podkamennaja Tunguska [Climate-driven “greening” of the kurum landscape in the valley of the lower reaches of the Podkamennaya Tunguska River], *InterKarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 1, p. 305–313, DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313. (In Russian)
- Wilson E.H., Sader S.A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 80, no. 3, p. 385–396, DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00318-2.
- Zheleznyak I.I., Malchikova I.Yu., Shpolyanskaya N.A., Janauskas A.I. *Kurumy Severnogo Zabaikaliya* [Kurums of Northern Transbaikalia], Novosibirsk, Nauka Publ., Sib. Otd., 1992, 182 p. (In Russian)
- Zolotokrylin A.N., Krenke A.N., Vinogradova V.V. *Rajonirovanie Rossii po prirodnym uslovijam zhizni naselenija* [Zoning of Russia by the natural living conditions], Moscow, GEOS Publ., 2012, 156 p. (In Russian)

Received 03.05.2023

Revised 16.01.2024

Accepted 24.04.2024