

УДК: 551.435.5:574.42

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313

А.А. Высоцкая¹, А.А. Медведков²

КЛИМАТОГЕННОЕ «ПОЗЕЛЕНЕНИЕ» КУРУМОВЫХ ЛАНДШАФТОВ В ДОЛИНЕ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ПОДКАМЕННАЯ ТУНГУСКА

АННОТАЦИЯ

Рассмотрено изменение биологической продуктивности ландшафтов курумов таежной зоны в связи с фиксируемым в Енисейской Сибири с середины 1970-х гг. – начала 1980-х гг. потеплением климата. На репрезентативных объектах ключевого района исследования, расположенного на западе Среднесибирского плоскогорья, рассмотрено изменение NDVI как показателя фитомассы за период с 1992 по 2018 гг. Для исследования биопродукционной динамики и современного состояния курумовых ландшафтов использовались космические снимки серии Landsat 4.5 (TM), 7 (ETM+), 8 (OLI) 30-метрового разрешения с проведенной атмосферной коррекцией (Landsat Surface Reflectance). Для уточнения полученной информации по отдельным курумам использовались многозональные снимки WorldView-1 (2,4 м) и PlanetScope (3 м).

Средний прирост NDVI с конца первого десятилетия XXI в. по 2019 г. составил 0,38 единиц. Это проявляется в увеличении площади покрова из мхов, разрастании кустарников, подроста мелколиственных пород и появлении разреженного древостоя. Данные, рассчитанные по результатам обработки космических снимков 30-метрового разрешения (Landsat) показывают высокую корреляцию с результатами, полученными при работе с их аналогами более высокого разрешения (WorldView-1 и PlanetScope). Выявлено, что склоны холодных экспозиций, покрытые глыбовыми накоплениями, оказались более отзывчивыми на прирост фитомассы. Выводы, полученные при обработке данных дистанционного зондирования, позволяют экстраполировать результаты полевых исследований на большую площадь генетически единой территории. Выявлено, что интенсивность «позеленения» курумов в рассматриваемом районе средней тайги сопоставима с увеличением NDVI в более северных (тундровых, лесотундровых и северотаежных) районах Средней Сибири.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сибирская тайга, курумы, изменение климата, биологическая продуктивность, ландшафтные тренды, «позеленение», вегетационный индекс NDVI

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: an.vys@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: a-medvedkov@bk.ru

Anna A. Vysotskaya¹, Alexey A. Medvedkov²

CLIMATE-DRIVEN “GREENING” OF THE KURUM LANDSCAPE IN THE VALLEY OF THE LOWER REACHES OF THE PODKAMENNAYA TUNGUSKA RIVER

ABSTRACT

The paper considers changes in the biological productivity of the landscapes recorded in the Yenisei Siberian taiga kurums associated with climate warming of mid-1970s to early 1980s. Specifically, changes in NDVI (as an indicator of plant-mass productivity) from 1992 to 2018 were assessed within representative sites of the key study area located in the west of the Central Siberian Plateau. To study the bioproductivity dynamics and the current state of kurum landscapes, 30-meter resolution satellite images – Landsat 4.5 (TM), 7 (ETM+), and 8 (OLI) series – with atmospheric correction (Landsat Surface Reflectance) were used. Refinement of data on individual kurums was carried out with the help of WorldView-1 (2.4 m) and PlanetScope (3 m) multi-zone images.

From the end of the first decade of the 21st century to 2019, NDVI increased by 0.38 units, on average. This is manifested in a larger area under moss cover, spread of shrubs and small-leaved species undergrowth, and emergence of sparse stands. The data calculated from processing of the 30-meter resolution satellite images (Landsat) exhibit a high-degree correlation with the results obtained by using higher-resolution analogous images (WorldView-1 and PlanetScope). It appeared that the cold-exposure slopes covered with block accumulations were more responsive to the growth of plant-mass. The results of remote-sensing data processing allow for a field-based extrapolation within a large and genetically unified territory. It was revealed that the intensity of kurums “greening” in the considered middle taiga area is comparable with the increase in NDVI in even higher latitude regions (north taiga, forest-tundra, and tundra) of Central Siberia.

KEYWORDS: Siberian taiga, kurums, climate change, biological productivity, landscape trends, “greening”, vegetation index NDVI

ВВЕДЕНИЕ

Данные дистанционного зондирования широко используются в исследованиях динамики природных процессов и геосистемного покрова. Средства данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) фиксируют трансформацию ландшафтов через изменения их спектральных характеристик. Очевидно, что при верификации результатов их обработки наземными наблюдениями, полученные данные являются достоверными источниками информации о состоянии ландшафтов. В качестве таких индикаторов могут выступать, например, объем биомассы и сомкнутость растительного покрова, содержание хлорофилла, коррелирующие с NDVI [Осинов и др., 2012]. Динамика NDVI используется при изучении климатогенных откликов ландшафтов в циркумполярных районах Северной Америки и Евразии [Jia et al., 2009; Целелев и др., 2015; Тишков и др., 2015; Ju, Masek, 2016; Туткова, Виноградова, 2019]. Считаем, что данное обстоятельство позволяет использовать NDVI для решения тех же задач, но применительно к условиям бореальной криолитозоны Среднесибирского плоскогорья.

Большинство из опубликованных исследований посвящены «позеленению» территорий в Арктике и Субарктике, тогда как в отношении других холодных регионов,

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: an.vys@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: a-medvedkov@bk.ru

например, бореальной криолитозоны, данные процессы значительно менее изучены. В бореальной криолитозоне наиболее уязвимой оказывается часть ее территории, характеризующаяся островным и прерывистым развитием многолетнемерзлых пород, в данных геокриологических условиях любые изменения проявляются наиболее заметно [Медведков, 2018]. К числу таких районов, располагающихся на юге криолитозоны, относится значительная часть бассейна р. Подкаменная Тунгуска. К наиболее уязвимым ландшафтам в ее пределах отнесены курумы таежного пояса [Медведков, 2018]. Курумы в самом общем виде – скопления преимущественно глыбового материала на склонах крутизной от первых градусов до 35–40° [Говорушко, 1986].

В контексте наших исследований, климатогенные отклики ландшафтов изучались на западной периферии Среднесибирского плоскогорья, в пределах долинного комплекса нижнего течения р. Подкаменная Тунгуска (рис. 1). В зональном отношении – это ландшафты средней тайги и область островного и массивно-островного распространения многолетней мерзлоты. Здесь сукцессионные изменения наиболее заметно проявляются в пределах курумных ландшафтов таежной зоны [Медведков, 2018], что позволяет их рассматривать в качестве информативных индикаторов глобальных изменений климата. Учитывая, что ключевые участки исследования располагаются на территории охотничье-промысловых угодий суломайских кетов, фиксирующих изменения в местообитании животных и водности малых и средних рек в связи с сукцессионной динамикой курумных ландшафтов, анализ происходящих изменений в их пределах приобретает социальное звучание.

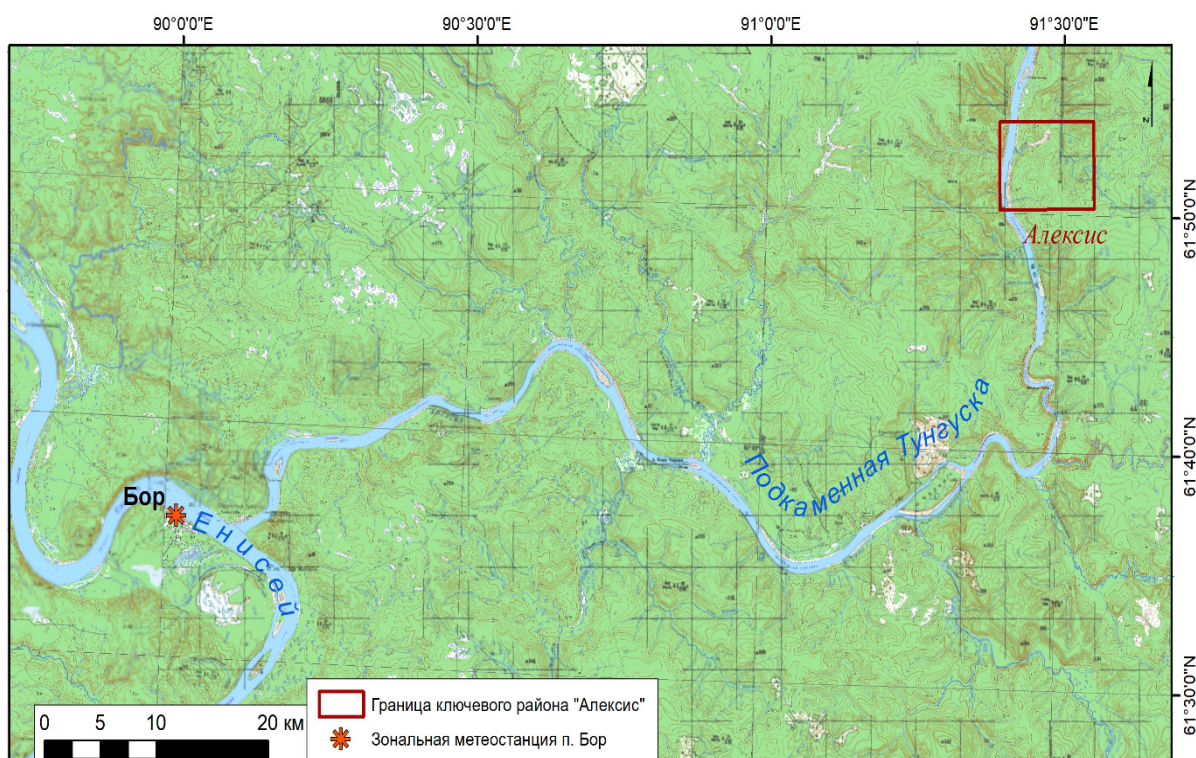


Рис. 1. Расположение района исследования «Алексис» (именуется по названию небольшой реки, впадающей в р. Подкаменная Тунгуска)
 Fig. 1. Location of the Alexis study area (named after a small river that flows into the Podkamennaya Tunguska River)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования биопродукционной динамики и современного состояния курумных ландшафтов таежной зоны использовались космические снимки серии Landsat 4.5 (TM), 7 (ETM+), 8 (OLI) 30-метрового разрешения с проведенной атмосферной

коррекцией (Landsat Surface Reflectance), что позволяет рассчитывать вегетационные индексы без дополнительных преобразований снимка. Из всех доступных на данную территорию снимков были выбраны 6 летних (июль – середина вегетационного периода, когда NDVI в среднем достигает максимальных значений) с минимальной облачностью и с близкой датой съемки для устранения влияния на спектральные характеристики различных фенологических фаз развития: 14.07.1992, 29.07.2000 (часть курумов под облаками), 20.06.2006, 16.07.2007, 14.07.2009, 25.06.2017 и 14.07.2018.

Далее в ArcMap 10.5 были синтезированы RGB-изображения в ложных цветах (ближний инфракрасный, красный, зеленый), что позволило дешифровать курумы. На полученном синтезированном изображении курумы распознаются проще (в сравнении с изображением в естественных цветах), так как на нем более контрастно выделяются открытые горные породы (ярко-голубовато-зеленый) и растительность (ярко-красный). Затем, в пределах полученного векторного слоя курумов были рассчитаны значения NDVI как показателя фитомассы (рис. 2). Каждому значению NDVI соответствует свое состояние растительного покрова (табл. 1).

Табл. 1. Соответствие значений NDVI с разными типами поверхности
[Rouse et al, 1973]

Table 1. Correspondence of NDVI values with different surface types
[Rouse et al, 1973]

Тип поверхности	Значения NDVI
Густая растительность	0,7 и выше
Растительность средней густоты	0,3 – 0,6
Разреженная растительность	0,2 – 0,3
Открытая почва	0,02 – 0,1
Облака	0
Вода	менее 0
Искусственные материалы	-0.4 – -0,5

Для уточнения снимков Landsat использованы многозональные снимки WorldView-1 (26.08.2012; 2,4 м), PlanetScope (17.08.2019; 3 м), которые прошли ту же обработку. Растр NDVI, полученный по снимку с WorldView-1, был приведен к 3-метровому разрешению для сопоставления с PlanetScope (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Современная климатическая динамика может быть охарактеризована по результатам обработки первичных метеоданных. Выявлено, что величины среднегодовых температур воздуха, по данным зональной гидрометеорологической обсерватории (ЗГМО) в пос. Бор (измерения с 1936 г.), четко фиксируют начало современного потепления с 1975 г. Отметим, что среднегодовые температуры воздуха по настоящее время продолжают увеличиваться и показывают высокую степень корреляции ($r > 0,9$) с данными других метеостанций в Приенисейской Сибири, как было показано в более ранних исследованиях [Gorshkov et al., 2013]. Данное обстоятельство позволяет судить о масштабности и однонаправленности происходящих в Енисейском регионе климатических процессов.

Результатом потепления климата является не только рост среднегодовых температур воздуха, но и увеличение суммы активных температур и продолжительности вегетационного периода. Так, проведенный авторами анализ метеоданных ЗГМО «Бор» показал, что за период с 1990 по 2018 гг. сумма активных температур из расчета выше 5°C возросла в среднем на 110°C (до 1840°C), а из расчета более 10°C – на 130°C (до 1560°C). Вегетационный период в каждом случае увеличился на несколько дней за счет более ранних сроков начала вегетации. Очевидно, что подобные изменения могут

являться фактором ландшафтной динамики, о чем также свидетельствуют данные повторных полевых исследований [Горшков и др., 2003; Medvedkov, 2015; Медведков, 2018], а результаты обработки космоснимков в форме расчета значений NDVI позволяют экстраполировать выводы, полученные на ключевых участках, на более обширную территорию.

В качестве ключевого в данном исследовании выбран район на левобережье Подкаменной Тунгуски, характеризующийся развитием курумов. Это область выхода на поверхность траптовых пород раннего-среднего триаса, из которых и формируются глыбовые накопления, ставшие объектом данного исследования, по которым, собственно, и рассчитывались значения NDVI (рис. 2, табл. 2). Важно заметить, что рассматриваемая территория входит в границы лесного участка суломайских кетов (этно-хозяйственной группы подкаменнотунгусских кетов), предназначенного для ведения ими охотничье-промыслового хозяйства.

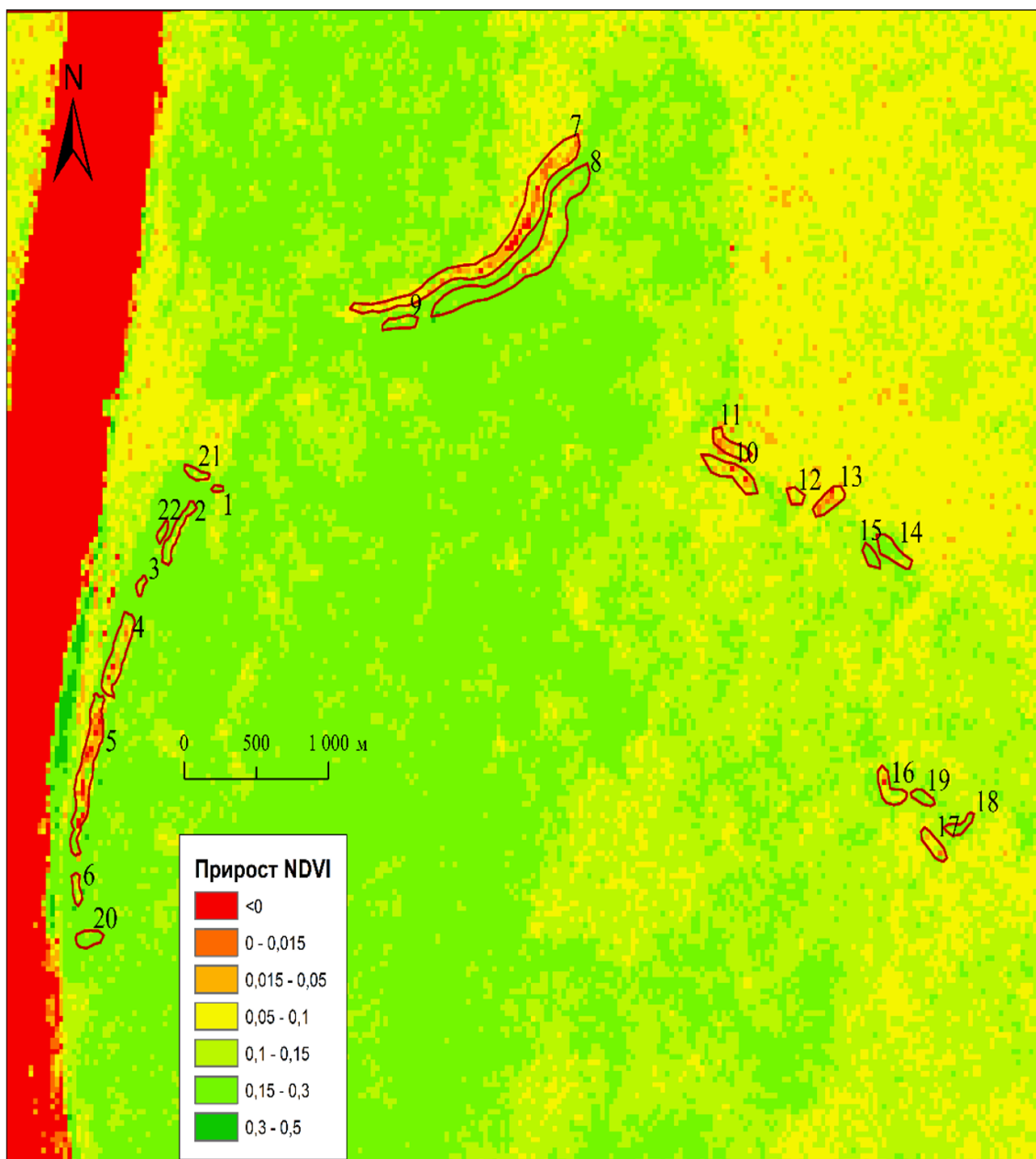


Рис. 2. Динамика NDVI на курумах ключевого района исследования «Алексис» с 1992 по 2018 гг. (левобережье р. Подкаменная Тунгуска в ее нижнем течении)
 Fig. 2. Dynamics of NDVI on the kurums of the Alexis key study area from 1992 to 2018 (left bank of the river Podkamennaya Tunguska in its lower reaches)

Табл. 2. Основные характеристики склоновых поверхностей с покровом из курумов
 Table 2. Main characteristics of slope surfaces covered with kurums

Район исследования	Обозначение курума на рис. 2	Площадь, м ²	Экспозиция, °	Крутизна, °	Δ NDVI
Алексис	1	1800	351 север	20	0,174
	2	20700	293 северо-запад	10	0,162
	3	5400	295 северо-запад	14	0,179
	4	42300	289 запад	23	0,116
	5	71100	284 запад	27	0,070
	6	7200	270 запад	23	0,142
	7	167400	145 юго-восток	14	0,066
	8	150300	303 северо-запад	18	0,161
	9	14400	242 юго-запад	21	0,174
	10	32400	58 северо-восток	16	0,090
	11	19800	223 юго-запад	16	0,066
	12	8100	249 запад	17	0,101
	13	20700	155 юго-восток	12	0,055
	14	21600	213 юго-запад	8	0,160
	15	9900	49 северо-восток	16	0,180
	16	18900	232 юго-запад	8	0,116
	17	16200	38 северо-восток	13	0,092
	18	9900	175 юг	14	0,159
	19	7200	216 юго-запад	14	0,143
	20	12600	230 юго-запад	19	0,178
	21	8100	17 север	19	0,170
	22	5400	302 северо-запад	23	0,196

Таким образом, по результатам проведенного анализа были выделены три группы курумов, характеризующиеся разными скоростями прироста фитомассы (рис. 2, табл. 2):

1 группа отличается наиболее выраженной положительной динамикой NDVI с диапазоном значений от 0,159 до 0,196 (курумы этой группы на рис. 2 обозначены под №№ 1, 2, 3, 9, 14, 15, 18, 20 и 22);

2 группа характеризуется средней по интенсивности динамикой прироста NDVI с диапазоном значений от 0,116 до 0,143 (объекты этой группы на рис. 2 обозначены под №№ 4, 6, 8, 16, 19);

3 группа выделяется значительной инертностью биопродукционных процессов с диапазоном показателей NDVI от 0,055 до 0,101 (курумы данного типа на рис. 2 обозначены под №№ 4, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 17).

В целом за изучаемый период для курумных ландшафтов района исследования «Алексис» отмечается увеличение значений NDVI с 0,57 (+/- 0,07) до 0,69 (+/- 0,08), что является ощутимым изменением, ориентируясь на данные, представленные в табл. 1. Величина тренда в среднем составляет + 0,04 единицы за 10 лет, что по интенсивности сопоставимо с выявленными изменениями NDVI для ландшафтов тундры, лесотундры и северной тайги Средней Сибири [Титкова, Виноградова, 2019]. Выявлено, что в пределах ключевого района исследования «Алексис» наиболее интенсивный прирост значений вегетационного индекса прослеживается в курумах преимущественно северной, северо-восточной и северо-западной экспозиций (более чувствительным к изменению теплообеспеченности). Опираясь на результаты полевых исследований, отметим, что указанные значения свидетельствуют об увеличении площади покрова из мхов, разрастании кустарников и подроста мелколиственных пород.

Тематическая обработка снимков 3-метрового разрешения позволила подтвердить тренд, полученный при использовании снимков Landsat в отношении курума под № 5 на рис. 2 и в табл. 2, отнесенного к 3 группе по интенсивности прироста фитомассы. Средний прирост NDVI с конца первого десятилетия – начала второго десятилетия XXI в. по 2019 гг. составил 0,38 единиц (с 0,12 до 0,5, рис. 3), что коррелирует с трендом схожей интенсивности на увеличение значений индекса, рассчитанных по Landsat. Данное изменение показателей NDVI соответствует медленному переходу открытых глыбовников в закрытые (т. е. покрытые лишайниками и подростом из мелколиственного леса). Прирост значений NDVI проявляется по всей площади курума, представленного на рис. 3, за исключением отдельных пикселей.

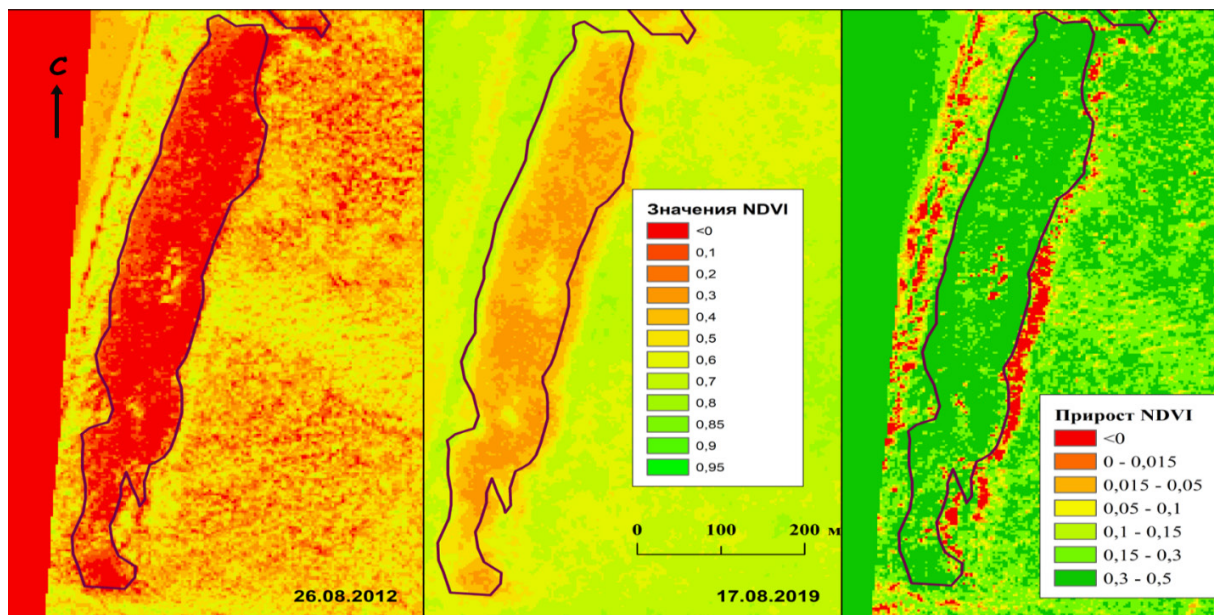


Рис. 3. Многолетняя динамика NDVI на поверхности курума по данным снимков 3-метрового разрешения (WorldView-1 и PlanetScope)

Fig. 3. Long-term dynamics of NDVI on the surface of kurum according to 3-meter resolution images (WorldView-1 and PlanetScope)

Сопоставление результатов обработки космоснимка высокого (3-метрового) разрешения с полученными данными по снимку 30-метрового разрешения показывает, что последние сильно усредняют значение, так как в пределы пиксела попадают не только курумы, но и окружающая их тайга. Однако основной тренд «позеленения» курумов в форме их зарастания они отражают, а наличие длительного ряда полевых наблюдений делает объект на рис. 3 весьма ценным.

ВЫВОДЫ

Заращение курумов является индикатором изменения границ зональных типов ландшафтов. Курумные ландшафты на западе Среднесибирского плоскогорья переходят в состояния, более характерные для южной тайги, что подтверждает изменение ландшафтных условий. Вместе с тем, данные полевых исследований позволяют судить о том, что сукцессионные изменения ландшафтов курумов запускают механизм развития в них отрицательных обратных связей [Medvedkov, 2015]. Так, за счет увеличения растительного покрова повышается доля тепла, затрачиваемого на испарение, а моховой покров изолирует глыбы, не позволяя им прогреваться. Данные процессы участвуют в восстановлении температурно-водного режима курумов и создают условия для формирования подкурумового стока, играющего важную роль в водном режиме малых и средних рек.

В пределах ключевого района исследования «Алексис» было выявлено, что склоны холодных экспозиций, покрытые глыбовыми накоплениями, оказались более отзывчивыми на прирост фитомассы (в форме увеличения значений вегетационного индекса NDVI). Это может быть обусловлено заметным улучшением теплообеспеченности – важнейшего для биоты лимитирующего фактора в данных для средней тайги условиях местоположения курумов.

Проведенный анализ данных дистанционного зондирования позволил оценить, что выявленный в рассматриваемом районе тренд «позеленения» курумов сопоставим по интенсивности с зафиксированными изменениями NDVI для тундровых, лесотундровых и северотаежных ландшафтов Средней Сибири.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 21-77-00048, <https://rscf.ru/project/21-77-00048/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Говорушко С.М. Курумный морфолитогенез. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. 120 с.
2. Горшков С.П., Ванденберг Дж., Алексеев Б.А., Мочалова О.И., Тишкова М.А. Климат, мерзлота и ландшафты Среднеенисейского региона. М.: МГУ, 2003. 81 с.
3. 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).
4. Осипов В.И., Викторов А.С., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Капранова В.Н. Геоиндикаторы изменений окружающей среды районов разработки месторождений твердых полезных ископаемых и методы их оценки. Георесурсы, геоэнергетика, геополитика, 2012. № 2 (6). С. 21–39.
5. Титкова 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.
6. Тишков А.А., Кренке-мл. А.Н. «Позеленение» Арктики в XXI в. как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения. Арктика: экология и экономика, 2015. № 4. С. 28–37.
7. Цепелев В.Ю., Паниди Е.А., Торлопова Н.В., Бобков А.А. Использование характеристик растительного покрова таежной зоны для мониторинга климатических изменений XXI в. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 2015. № 40. С. 221–235.

8. *Gorshkov S., Evseeva L., Mochalova O., Touchart L., Ballais J., Simone Y.* Environment, economy and community of the upper Angara and middle Yenisei regions: impact of climate change and water reservoir cascades built on the Angara and Yenisei rivers. *Polar Record*, 2013. V. 49. No. 3. P. 254–260. DOI: 10.1017/S0032247413000107.
9. *Jia G., Epstein H., Walker D.* Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming. *Journal of Environmental Monitoring*, 2009. V. 11. P. 2231–2238. DOI: 10.1039/B911677J.
10. *Ju J., Masek J.* The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2016. V. 176. P. 1–16. DOI: 10.1016/J.RSE.2016.01.001.
11. *Medvedkov A.A.* Geoenvironmental Response of the Yenisei Siberia Mid-Taiga Landscapes to Global Warming during Late XX–Early XXI Centuries. *Water Resources*, 2015. V. 42. No. 7. P. 922–931. DOI: 10.1134/S0097807815070076.
12. *Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / 3rd ERTS Symposium. NASA SP-351, 1973. V. 1. P. 309-317.

REFERENCES

1. *Gorshkov S., Evseeva L., Mochalova O., Touchart L., Ballais J., Simone Y.* Environment, economy and community of the upper Angara and middle Yenisei regions: impact of climate change and water reservoir cascades built on the Angara and Yenisei rivers. *Polar Record*, 2013. V. 49. No. 3. P. 254–260. DOI: 10.1017/S0032247413000107.
2. *Gorshkov S.P., Vandenberg J., Alekseev B.A., Mochalova O.I., Tishkova M.A.* Climate, permafrost and landscapes of the Middle Yenisei region. Moscow: MSU, 2003. 81 p. (in Russian).
3. *Govorushko S.M.* Kurum morpholithogenesis. Vladivostok: Far Eastern Research Centre of the USSR Academy of Sciences, 1986. 120 p. (in Russian).
4. *Jia G., Epstein H., Walker D.* Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming. *Journal of Environmental Monitoring*, 2009. V. 11. P. 2231–2238. DOI: 10.1039/B911677J.
5. *Ju J., Masek J.* The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2016. V. 176. P. 1–16. DOI: 10.1016/J.RSE.2016.01.001.
6. *Medvedkov A.A.* Climatogenic dynamics of Siberian taiga landscapes in the Middle Yenisei basin. *Geography and Natural Resources*, 2018. No. 4. P. 122–129 (in Russian). DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(122-129).
7. *Medvedkov A.A.* Geoenvironmental Response of the Yenisei Siberia Mid-Taiga Landscapes to Global Warming during Late XX–Early XXI Centuries. *Water Resources*, 2015. V. 42. No. 7. P. 922–931. DOI: 10.1134/S0097807815070076.
8. *Osipov V.I., Viktorov A.S., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Arkhipova M.V., Kapralova V.N.* Geoindicators of environmental changes in areas of development of deposits of solid minerals and methods of their assessment. *Georesources, Geoenergy, Geopolitics*, 2012. No. 2 (6). P. 21–39 (in Russian).
9. *Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / 3rd ERTS Symposium. NASA SP-351, 1973. V. 1. P. 309-317.
10. *Tishkov A.A., Krenke-Jr. A.N.* “Greening” of the Arctic in the 19th century. as a synergistic effect of global warming and economic development. *Arctic: Ecology and Economics*, 2015. No. 4. P. 28–37 (in Russian).
11. *Titkova T.B., Vinogradova V.V.* Climate changes in the transitional natural zones of the North of Russia and their manifestation in the spectral characteristics of landscapes. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2019. V. 16. No. 5. P. 310–323 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323.
12. *Tsepelev V.Yu., Panidi E.A., Torlopova N.V., Bobkov A.A.* Using the characteristics of the vegetation cover of the taiga zone for monitoring climate change in the 19th century. *Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*, 2015. No. 40. P. 221–235 (in Russian).