

УДК: 911.2:551.34

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-366-375

Р.Г. Алиев¹, А.А. Медведков^{1,2}

АНАЛИЗ КЛИМАТОГЕННОЙ ДИНАМИКИ БАТАГАЙСКОГО ТЕРМОДЕНУДАЦИОННОГО «КРАТЕРА» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается вклад климатогенного фактора в развитие Батагайского термоденудационного «кратера» — крупнейшего в мире объекта, имеющего термоденудационное происхождение. Батагайский «кратер» — результат ускоренной активизации процессов экзодинамики в условиях сплошной криолитозоны Янского плоскогорья (северная Якутия), располагающийся в самом холодном районе России. По космоснимкам со спутников серии Landsat (Landsat-7 и Landsat-8) за период с 1999 по 2017 гг. устанавливалась скорость его роста с учётом экспозиционного фактора за определенные временные интервалы. По отобраным космоснимкам производилось их визуальное дешифрирование для выделения бровки «кратера» применительно к каждому году за весь 18-летний период. Полученные результаты сопоставлялись с климатическими показателями за соответствующие промежутки времени. Из климатических данных анализировались те из них, которые имели положительную динамику и благоприятствовали развитию термоденудационных процессов. Так, для района Батагайского «кратера» за последние 50 лет наблюдается стабильная тенденция роста температурных значений (среднелетних на 1,6 °С и среднегодовых на 2,2 °С) и количества атмосферных осадков (увеличение годовой суммы на 25 мм за счёт летне-осеннего периода). За последние два десятилетия выявлена определённая корреляционная связь между скоростью роста Батагайского «кратера» и динамикой основных климатических показателей. За анализируемый период установлено, что наибольшей скоростью деградации отличается северо-западный борт «кратера». Учитывая статистически выявленную взаимосвязь, а также высокую льдистость пород (40–60 %) и их особую песчано-жильную структуру, можно считать Батагайский «кратер» ярким индикатором потепления климата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: термокарст, термоэрозия, криолитозона, Батагайский «кратер», индикация климатических изменений

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

² Московский государственный областной университет, ул. Веры Волошиной, д. 24, 141014, Мытищи, Московская область, Россия; *e-mail*: a-medvedkov@bk.ru

Ruslan G. Aliev¹, Aleksey A. Medvedkov^{1,2}

ANALYSIS OF THE CLIMATOGENIC DYNAMICS OF THE BATAGAI THERMODENUDATION “CRATER” USING REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

The article discusses the contribution of the climatogenic factor to the development of the Batagai thermo-denudation “crater” — the largest object in the world of thermo-denudation origin. The Batagai “crater” is the result of accelerated activation of exodynamic processes in the continuous permafrost zone of the Yansky Plateau (Northern Yakutia), located in the coldest region of Russia. According to satellite imagery from Landsat series satellites (Landsat-7 and Landsat-8) for the period from 1999 to 2017. The rate of its growth was established taking into account the exposure factor for certain time intervals. Based on the selected satellite images, they were visually decrypted to highlight the “crater” edge, with reference to each year for the entire 18-year period. The results obtained were compared with climatic indicators for the corresponding time intervals. From climate data, those were analyzed that had positive dynamics and favored the development of thermo-denudation processes. So, for the Batagai “crater” area over the past 50 years, there has been a stable tendency towards an increase in temperature values (average summer by 1,6 °C and average annual by 2,2 °C) and the amount of precipitation (an increase in the annual amount of 25 mm due to summer autumn period). Over the past two decades, a certain correlation has been revealed between the growth rate of the Batagai “crater” and the dynamics of the main climatic indicators. During the analyzed period, it was established that the northwestern side of the “crater” is distinguished by the highest rate of degradation. Given the statistically revealed relationship, as well as the high ice content of the rocks (40–60 %) and their special sand vein structure, this allows us to consider the Batagai “crater” — a vivid indicator of climate warming.

KEYWORDS: thermokarst, thermal erosion, cryolithozone, Batagai “crater”, indication of climate change

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время объекты криосферы и мерзлотные ландшафты подвергаются интенсивному воздействию потепления климата. Особый интерес в пределах криолитозоны представляют скульптурные формы рельефа или специфические ландшафтные урочища, которые могут выступать в качестве информативных индикаторов современного изменения климата [Медведков, 2018]. Учитывая, что темпы потепления климата в Арктическом регионе характеризуются наибольшими скоростями [Мохов, 2014], необходимо выявлять такие индикаторные объекты и наблюдать за их состоянием, раскрывая механизмы их развития в условиях меняющейся среды. Это необходимо для прогнозирования неблагоприятных природных явлений в самых разных областях современной криолитозоны. Важность научных исследований по данной тематике подтверждается положениями действующей Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности. Так, в целях научно-технологического развития предусматривается проведение комплексных научных исследований по изучению опасных природных явлений в Арктической зоне Российской Федерации, разработке и внедрению современных технологий и методов их

¹ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia;
e-mail: kazlukarkivan@yandex.ru; a-medvedkov@bk.ru

² Moscow Region State University, Vera Voloshina str., 24, 141014, Mytishchi, Moscow Region, Russia;
e-mail: a-medvedkov@bk.ru

прогнозирования в условиях меняющегося климата¹. Исследование арктических территорий ввиду их труднодоступности не представляется возможным без применения данных ДЗЗ. Считаем, что перспективным подходом к доведению информации о реальности происходящих природно-экологических изменений в связи с потеплением климата, являются визуализированные данные о состоянии ключевых индикаторов. В этой связи особый интерес представляет изучение по разновременным космоснимкам динамики крупнейшего в мире термоденудационного объекта. Батагайская котловина с её известным «кратером» — это подходящий полигон для изучения изменений, происходящих в самом холодном районе России. Исследуемый индикаторный объект располагается на севере Якутии в Верхоянском районе (улусе), в 8 км от районного центра — посёлка Батагай у подножия г. Киргиллях и назван в честь протекающей рядом р. Батагайки — притока р. Яны. Подобные образования имеются в Северной Америке, на территории Канады, но они значительно меньше рассматриваемого нами объекта. Формированию столь площадного объекта способствовали высокая льдистость пород (40–60 %) и их особая песчано-жильная структура. В бассейне р. Яны в связи с суровыми климатическими условиями (среднегодовая температура воздуха $-15,9$ °С) получила развитие сплошная низкотемпературная толща мёрзлых пород мощностью от 200 до 500 м, с температурой от $-6,0$ до $-10,0$ °С [Некрасов, Девяткин, 1974; Мурзин, Русаков, 1996]. Известно, что такие мощные сингенетические повторно-жильные льды обычно встречаются в едомных толщах на побережьях арктических морей и озёр, тогда как в континентальных районах гор и предгорий они представлены значительно слабее, что делает их менее изученными в сравнении с береговыми комплексами [Васильчук и др., 2019]. Такие образования представляют особый интерес для палеоклиматических реконструкций [Васильчук и др., 2019; Ashastina et al., 2017; Murton et al., 2017]. Ландшафты Батагайской котловины представлены редкостойной лиственнично-ерниковой тайгой и характеризуются пониженными биопродукционными показателями, что типично для лесных экосистем сплошной криолитозоны. Так, средняя высота лиственницы даурской — 12–14 м, а диаметр — 10–14 см [Саввинов и др., 2018]. Такие природные комплексы отличаются наибольшей уязвимостью к любым внешним воздействиям (в т.ч. климатогенным). Отметим, что за последние 50 лет в Верхоянском улусе наблюдаются быстрые климатические изменения: рост среднегодовой температуры воздуха на $2,2$ °С, увеличение среднелетней температуры на $1,6$ °С, среднезимней — на $0,9$ °С, рост годовой суммы осадков на 25 мм (за счёт летнего периода). Данные выводы были нами сделаны по результатам обработки и анализа первичных гидрометеоданных. Происходящие климатические изменения благоприятствуют усилению термоденудационных процессов, которые с начала 90-х гг. особенно активизировались. Так, у подножия г. Киргиллях группа существующих просянок в 1991–1992 гг. объединилась, обвалив боковые стенки промоины, принявшей форму единой вытянутой капли [Куницкий и др., 2013]. Помимо фактора климатических изменений, который выступает в роли своеобразного триггера, его развитию также способствовало влияние антропогенного (влияние близлежащего карьера, рис. 1) и неотектонического факторов (активное воздымание). Данные факторы вносят свой вклад в эволюцию мерзлотных ландшафтов и формирование геоэкологической обстановки Верхоянья [Мурзин, 2019].

Батагайский объект в морфологическом отношении включает следующие его составляющие: термоденудационная промоина, термоэрозионный котёл и термоэрозионный овраг. В рамках данной статьи искомым объектом со всеми его морфологическими составляющими мы будем называть Батагайским «кратером». Сейчас его размеры составляют более 1,5 км в длину и более 800 м в ширину, причем его границы

¹ Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. Электронный ресурс: <http://government.ru/info/18360/> (дата обращения 06.04.2020)

продолжают ежегодно увеличивать на 10–15 м, а в ширину на 20–25 м. Темпы термоденудации склоновой поверхности сопоставимы со скоростью отступления арктических берегов, что объясняется схожими генетическими особенностями льдистых пород [Куницкий и др., 2013]. Средняя глубина «кратера» составляет 60 м, а в районе термоэрозионного котла она достигает 100 м, колеблясь в зависимости от льдистости грунта и связанной с этим активностью термокарста. Батагайский «кратер» занимает площадку неактивной криопланационной террасы на стыке пологого склона и размывтой поверхности подгорной равнины. Поверхность расположена на горной седловине, имеет незначительный (3°) уклон в сторону р. Батагайки. Идущий сверху ручей проходит вдоль котловины, активно дренирует её и выносит обломочный материал в реку. На ниже представленной карте (рис. 1), созданной на основе цифровой модели рельефа GMTED2010, заметно выделяются три гипсометрических уровня: долинно-днищевый комплекс, нижняя поверхность выравнивания, представленная пологими склонами и подгорной равниной, в верхнюю часть которой врезается овраг, и верхняя поверхность выравнивания, представленная отдельными останцами.

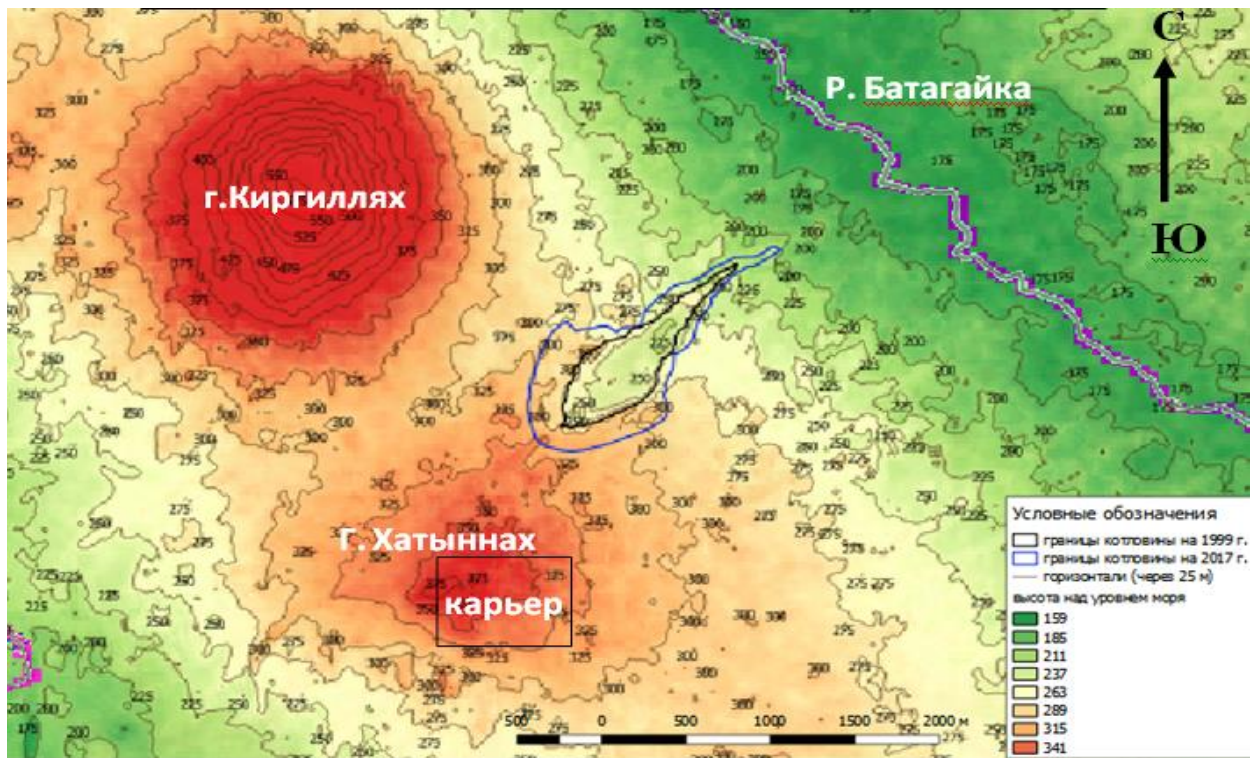


Рис. 1. Гипсометрическая карта окрестностей Батагайского «кратера»
 Fig. 1. Hypsometric map of the surroundings of the Batagai “crater”

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения весомости вклада климатогенного фактора в формирование Батагайского термоденудационного «кратера» нами устанавливалась скорость его роста за определённые временные интервалы, которые сопоставлялись с климатическими показателями за соответствующие промежутки времени. Оценка динамики производилась на базе использования данных дистанционного зондирования. Наиболее актуальными для нас являлись снимки со спутников серии Landsat (Landsat-7 и Landsat-8), обладающие относительно высоким пространственным разрешением и обширной базой за продолжительный период времени. Таким образом, за период с 1999 по 2017 гг. отобраны космические снимки, покрывающие площадь изучаемой территории без помех и облаков.

Космоснимки подбирались в даты, максимально приближенные к завершению тёплого сезона (конец августа — начало сентября).

После отбора необходимых для исследования космоснимков проводилось их визуальное дешифрирование для выделения бровки «кратера», применительно к каждому из годов за период исследования. Отметим, что в процессе дешифрирования космоснимков с целью более точного определения границ «кратера» использовалось сразу несколько комбинаций. В первую очередь акцент делался на чёрно-белом панхроматическом канале, имеющем разрешение 15 м, но в нём не всегда чётко прослеживались все очертания, и для уточнения ситуации также использовались комбинация в естественных цветах (для Landsat-7 — это каналы 3,2,1, для Landsat-8 — каналы 4,3,2) и комбинация с ближним инфракрасным каналом (для Landsat-7 — это каналы 7,4,3, для Landsat-8 — каналы 7,5,4), имеющие разрешения 30 м. Последняя комбинация хорошо отражает изменения и нарушения почвенно-растительного покрова. Были получены 19 площадей на каждый год, после чего их сохранили в формате KML (рис. 2). Полученные файлы были открыты в программе Google Earth Pro. Далее для определения скорости роста «кратера» в его различных направлениях были проведены две прямые. Первая проходит вдоль промоины, дренирующей котловину, и направлена от переднего борта «кратера» до линии, визуальнo отделяющей его основную часть. Вторая прямая соединяет самые широкие участки бортов. По первой прямой измерялась длина основной части «кратера», вторая прямая, пересекаясь с первой, образует два отрезка, по одному измерялась ширина его северо-западного борта, а по другому — ширина его северо-восточного борта. Далее с помощью инструментов Google Earth Pro были вычислены длины необходимых отрезков, а также были посчитаны площади участков основной части котла за каждый год. Результаты измерений линейных и площадных параметров Батагайского «кратера» с 1999 по 2017 гг. проанализированы в данной работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные параметры показывают примерные изменения размеров, происходившие из года в год, поскольку имеются определённые погрешности, связанные со следующими факторами:

- относительно низкое разрешение снимков (до 15 м) для наблюдения за динамикой роста объекта размером приблизительно 1 x 1 км;
- не на каждый год имелись снимки на конец лета без помех и облаков;
- минимальные неточности в дешифрировании отобранных космоснимков; так, не всегда удавалось чётко разглядеть и выделить границы «кратера», особенно это касается его юго-восточного борта.

Представляется, что относительно точные показатели по средней скорости роста «кратера» можно получить путём деления общей площади изменений за весь анализируемый период на его продолжительность (18 лет). Таким образом, средняя скорость отступления передней стенки «кратера» составила ~ 11,8 м/год ((987–774 м)/18), северо-западного борта — ~ 12,9 м/год ((437,5–205 м)/18), юго-восточного борта — ~ 11,0 м/год ((446,8–247,5 м)/18).

Дальнейший анализ должен показать совокупную взаимосвязь скорости площадных изменений «кратера» и основных тенденций климатической динамики. Представляется, что более корректно производить сравнение ежегодного прироста «кратера» отдельно по каждому из экспозиционных направлений, анализируя параллельно тенденции изменения температуры и осадков. Выбранный подход опирается на вывод мерзлотоведов о значимой роли экспозиции склонов в теплообмене дневной поверхности с окружающей средой, о чём применительно к горным и предгорным условиям Северо-Восточной Сибири имеются количественные оценки [Геоэкология..., 1989].



*Рис. 2. Анализ динамики основной части Батагайского «кратера» с 1999 по 2017 гг.
Fig. 2. Analysis of the dynamics of the main part of the Batagai “crater” from 1999 to 2017*

Из климатических данных в первую очередь нас интересовали показатели, имеющие за анализируемый период в изучаемом районе положительную динамику и благоприятствующие развитию термоденудационных процессов (т.е. увеличение средней температуры воздуха и количества осадков). С 2000 по 2017 гг. использовались доступные данные по метеостанции в пос. Батагай. Для выявления долгосрочной динамики использовался архив метеоданных по г. Верхоянску, доступный на сайте ВНИИГМИ-МЦД. Для достоверности использования первичных метеоданных по г. Верхоянску, находящемуся в 55 км вверх по течению р. Яны, был посчитан коэффициент корреляции Пирсона. Применительно к двум рассматриваемым метеостанциям (пос. Батагай и г. Верхоянска) для анализируемых показателей (рис. 3 и 4) установлены высокие значения коэффициента корреляции (0,94–0,99). Полученные значения свидетельствуют о высокой репрезентативности используемых первичных данных по метеостанции г. Верхоянска. Далее поочередно просчитывалась линейная корреляция (коэффициент корреляции Пирсона) между такими показателями, как процент изменения площади, длины, ширины применительно к разным в экспозиционном отношении частям «кратера» и такими климатическими характеристиками, как среднелетняя температура года измерений, средняя температура воздуха с сентября прошлого года по август года измерений, сумма осадков с октября предшествующего по май года измерений, сумма осадков за лето, весну, весенне-летний период и осень.

Процент изменения длины «кратера» показал определённую его взаимосвязь с температурными показателями (рис. 3). Нам представляется, что для улучшения восприятия полученных взаимосвязей их нагляднее представить в процентах. Так, корреляционная связь со среднелетней температурой (за период с 2000 по 2017 г.) составила 54,5 % (0,545), а корреляция со средней температурой за период с сентября по

август с 1999 по 2017 гг. составила 56 % (0,56). Корреляционная связь с количеством осадков за все периоды проявилась не столь явно.

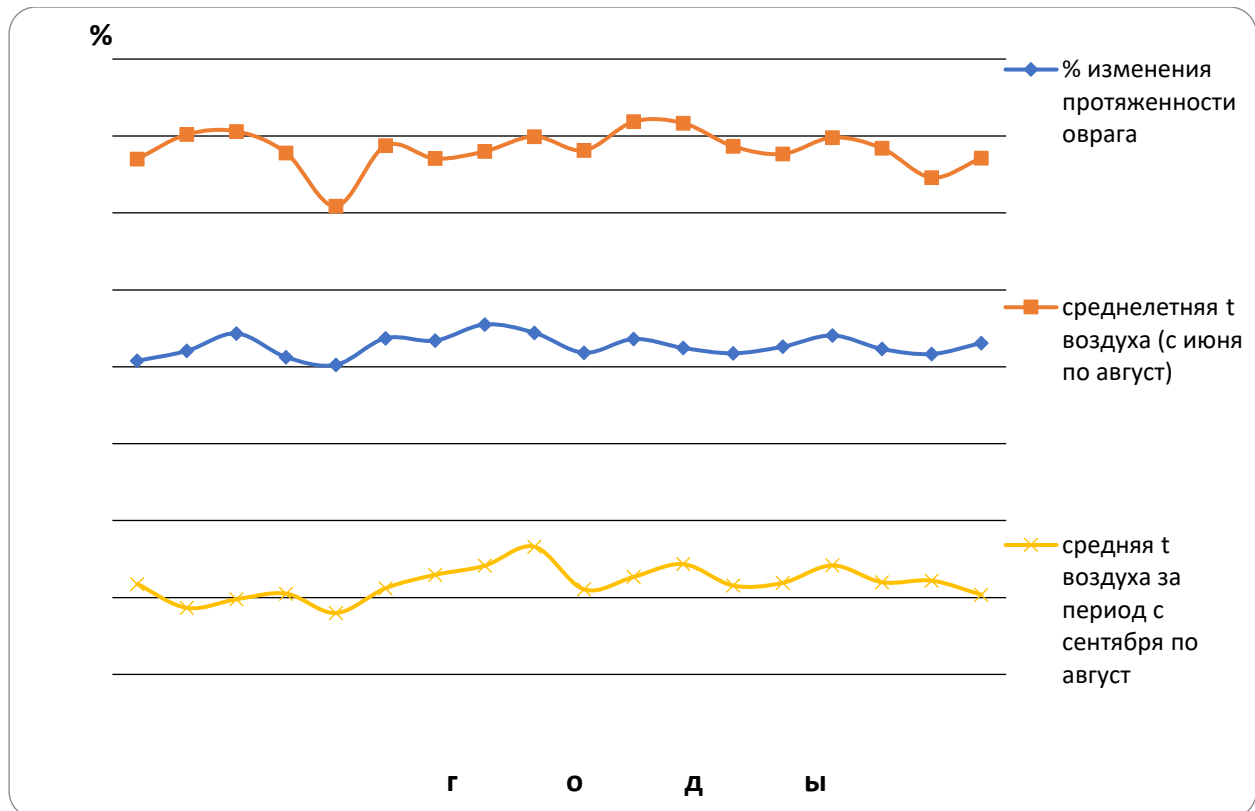


Рис. 3. Корреляционная связь между ростом длины котловины и динамикой температурных показателей
Fig. 3. The correlation between the growth of the length of the “crater” and the dynamics temperature indicators

Процент изменения ширины северо-западной стороны, наоборот, показал невысокую зависимость от температуры воздуха; при этом отмечается наличие взаимосвязи с суммой осадков за различные периоды (рис. 4). Корреляционная связь с суммой летних осадков слабо проявилась, корреляция с суммой осадков за период с октября по май составила 43 % (0,43), а коэффициент корреляции с суммой осадков за весенний период составил 0,57 (57 %).

Отмечена относительно высокая корреляционная связь между скоростью роста передней стенки термоденудационного котла и изменением температурных показателей (0,54–0,56 или 54–56 %), что в целом подтверждает чувствительность реакции термокарстовых процессов к повышению средней температуры воздуха.

Относительно высокая корреляционная связь между скоростью роста северо-западного борта «кратера» и суммой осадков за осенне-весенний период объясняется наличием в этой части рассматриваемого объекта сети промоин и борозд, которые в период активного снеготаяния наполняются проточной водой и активно дренируют прилегающие мёрзлые породы. Корреляционная связь с суммой летних осадков присутствует, но проявляется не столь ярко. Применительно к этому заметим, что в данном районе за последние 50 лет в первую очередь увеличилось количество осадков летнего периода, незначительно увеличилась сумма осенних осадков, а сумма весенних осадков не изменилась.

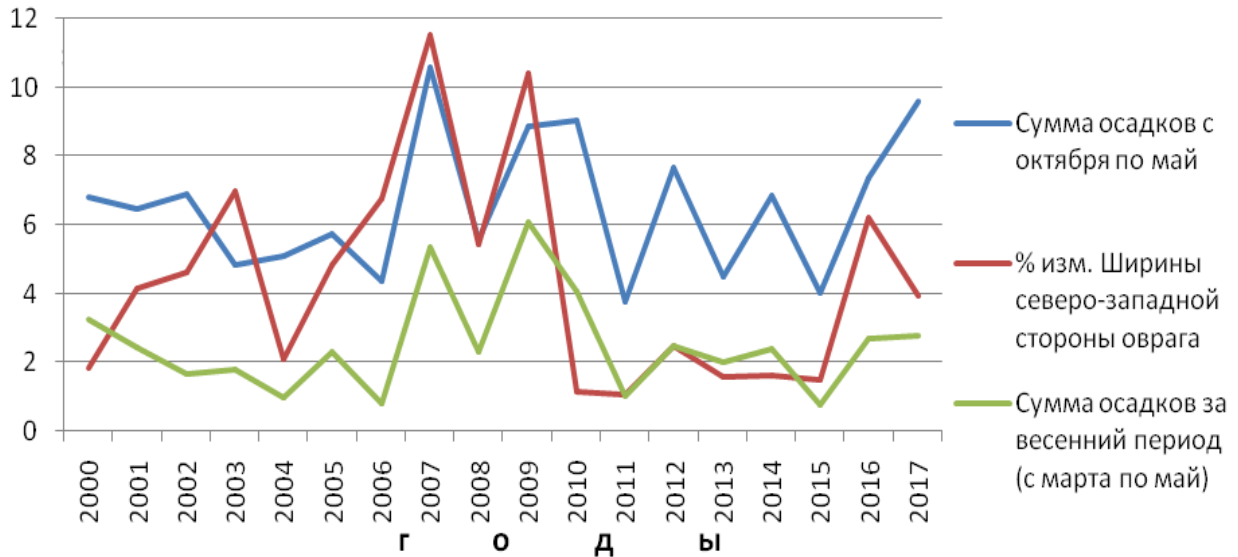


Рис. 4. Корреляционная связь между динамикой ширины северо-западной части «кратера» и колебанием осадков
Fig. 4. Correlation between the dynamics of the width of the northwestern part of the "crater" and the fluctuation of precipitation

Выявлено практически полное отсутствие линейной зависимости между ростом юго-восточной части «кратера» и динамикой климатических показателей. Это может быть связано с его меньшей льдистостью в юго-восточной части, что проявляется в замедлении роста «кратера» в данном направлении.

ВЫВОДЫ

За последние 50 лет в районе исследования наблюдаются быстрые климатические изменения с устойчивым трендом (повышение среднегодовой температуры воздуха, увеличение продолжительности периода с положительными температурами воздуха, рост количества осадков), способствующие развитию термоденудационных процессов. В то же время отмечается тренд на уменьшение его глубины в связи с активизацией самозакапывания «провала» обвальным материалом с его бортов и дальнейшим зарастанием новообразованных участков пионерной растительностью.

За последние два десятилетия выявлена относительно высокая корреляция между скоростью роста Батагайского «кратера» и динамикой основных климатических показателей. Это позволяет считать Батагайский «кратер» ярким индикатором потепления климата. Другие природные факторы, способствующие развитию исследуемого явления в сплошной криолитозоне: высокая температура и льдистость ММП, особая структура растительного покрова и низкий биопродукционный потенциал.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 18-05-00335.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 18-05-00335.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильчук Ю.К., Васильчук Дж.Ю., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Тришин А.Ю. Высокорастворяющие изотопно-кислородная и дейтериевая диаграммы в повторно-

- жильных льдах Батагайской едомы, север Центральной Якутии. Доклады Академии наук, 2019. Т. 487. № 6. С. 674–678. DOI: 10.31857/S0869-56524876674-678.
2. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М.: Недра, 1989. 515 с.
 3. *Куницкий В.В., Сыромятников И.И., Ширрмейстер Л., Скачков Ю.Б., Гроссез Г., Веттерих С., Григорьев М.Н.* Льдистые породы и термоденудация в районе поселка Батагай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь). Криосфера Земли, 2013. Т. XVII. № 1. С. 56–68.
 4. *Медведков А.А.* Климатогенная динамика ландшафтов сибирской тайги в бассейне Среднего Енисея. География и природные ресурсы, 2018. № 4. С. 122–129.
 5. *Мохов И.И.* Современные изменения климата Арктики. Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2014. С. 82–86.
 6. *Мурзин Ю.А.* Термокарст Восточного Верхоянья. Вестник СВФУ (Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова). Серия «Науки о Земле», 2019. № 1 (13). С. 48–54. DOI: 10.25587/SVFU.2019.13.27556.
 7. *Мурзин Ю.А., Русаков В.Г.* Температуры горных пород в бассейне р. Яны. Криолитозона и подземные воды Сибири. Ч. 1. Морфология криолитозоны. Якутск: Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН, 1996. С. 45–56.
 8. *Некрасов И.А., Девяткин В.Н.* Морфология криолитозоны бассейна р. Яны и сопредельных районов. Новосибирск: Наука, 1974. 72 с.
 9. *Саввинов Г.Н., Данилов П.П., Петров А.А., Макаров В.С., Боескоров В.С., Григорьев С.Е.* Экологические проблемы Верхоянского района. Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле», 2018. № 6 (68). С. 18–33. DOI: 10.25587/SVFU.2018.68.21798.
 10. *Ashastina K., Schirrmeister L., Fuchs M., Kienast F.* Palaeoclimate characteristics in interior Siberia of MIS 6-2: first insights from the Batagay permafrost mega-thaw slump in the Yana Highlands. *Climate of the Past*, 2017. V. 13. P. 795–818. DOI: 10.5194/cp-13-795-2017.
 11. *Murton Ju.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Anderson P.M., Savvinov G.N., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Danilov P.P., Boeskorov V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin S.V., Korzun Ju.A., Lupachev A.V., Tikhonov A., Tsygankova V.I., Vasilieva G.V., Zanina O.G.* Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana Uplands, Northeast Siberia. *Quaternary Research*, 2017. V. 87. P. 314–330.

REFERENCES

1. *Ashastina K., Schirrmeister L., Fuchs M., Kienast F.* Palaeoclimate characteristics in interior Siberia of MIS 6-2: first insights from the Batagay permafrost mega-thaw slump in the Yana Highlands. *Climate of the Past*, 2017. V. 13. P. 795–818. DOI: 10.5194/cp-13-795-2017.
2. *Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East.* Moscow: Nedra, 1989. 515 p. (in Russian).
3. *Kunitsky V.V., Syromyatnikov I.I., Schirrmeister L., Skachkov Yu. B., Grosse G., Wetterich S., Grigoriev M.N.* Ice-rich permafrost and thermal denudation in the batagay area (Yana Upland, East Siberia). *Earth's Cryosphere*, 2013. V. XVII. No 1. P. 56–68 (in Russian).
4. *Medvedkov A.A.* Climatogenic dynamics of Siberian taiga landscapes in the Middle Yenisei river basin. *Geography and Natural Resources*, 2018. No 4. P. 122–129 (in Russian).
5. *Mokhov I.I.* Modern climate change in the Arctic. *Scientific and technical problems of Arctic exploration.* Moscow: Nauka, 2014. P. 82–86.
6. *Murton Ju. B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Anderson P.M., Savvinov G.N., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Danilov P.P., Boeskorov V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin S.V., Korzun Ju.A., Lupachev A.V., Tikhonov A., Tsygankova V.I., Vasilieva G.V., Zanina O.G.* Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana Uplands, Northeast Siberia. *Quaternary Research*, 2017. V. 87. P. 314–330.

7. *Murzin Yu.A.* Thermokarst in the Eastern Verkhoyansk mountains. Vestnik of North-Eastern Federal University. Series "Earth Sciences", 2019. No 1 (13). P. 48–54. DOI: 10.25587/SVFU.2019.13.27556 (in Russian).
 8. *Murzin Yu.A., Rusakov V.G.* Rock temperatures in the basin of Yana River. Cryolithozone and groundwater of Siberia. Part 1. Morphology of cryolithozone. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute (MPI) SB RAS, 1996. P. 45–56 (in Russian).
 9. *Nekrasov I.A., Devyatkin V.N.* Morphology of permafrost zone of the basin of Yana River and adjacent areas. Novosibirsk: Nauka, 1974. 72 p. (in Russian).
 10. *Savvinov G.N., Danilov P.P., Petrov A.A., Makarov V.S., Boeskorov V.S., Grigoriev S.E.* Environmental problems of the Verkhoyansky Region. Vestnik of North-Eastern Federal University. Series "Earth Sciences", 2018. No 6 (68). P. 18–33. DOI: 10.25587/SVFU.2018.68.21798 (in Russian).
 11. *Vasil'chuk Y.K., Vasil'chuk J.Y., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.K., Trishin A.Yu.* High resolution stable oxygen deuterium diagrams of ice wedges of Batagay yedoma, North of Central Yakutia. Doklady Akademii nauk (Reports of the Academy of Sciences), 2019. V. 487. No 6. P. 674–678. DOI: 10.31857/S0869-56524876674-678 (in Russian).
-