

Ю.Я. Матчитов^{1,2}, С.Ж.-П. Гадал^{1,2}, Ю.Г. Данилов¹¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия²Университет Экс-Марсель, г. Марсель, Франция

E-mail: dan57sakha@mail.ru

E-mail: sebastien.gadal@univ-amu.fr

E-mail: match1304@mail.ru

ГЕОМОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭВОЛЮЦИИ ТЕРМОКАРСТОВОГО ПРОВАЛА БАТАГАЙ (БАТАГАЙКА) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС

Аннотация. Начиная с начала 2000-х годов зарубежными и российскими учеными проделаны многочисленные исследования динамики термокарстовых провалов, основанные на анализе разновременных космических снимков. В некоторых из них указывается на прямую взаимосвязь между изменением площади провалов и потеплением климата, в других такая связь не прослеживается. При этом в пределах одной и той же территории у разных исследователей наблюдаются противоречивые результаты, что обусловлено недостаточной разработанностью методик аэрокосмических исследований динамики термокарстовых провалов в имеющихся работах.

Поэтому актуальность разработки надежной методики исследований динамики термокарстовых провалов по космическим снимкам, а экспериментальные исследования в различных районах криолитозоны России, проведенные на основе общей для всех районов разработанной методики, позволяют выявить причины изменений и ответить на вопрос – могут ли термокарстовые провалы служить индикаторами реакции криолитозоны на современное потепление климата, что является не менее актуальной задачей [5].

Целью является выявление эффективных методик в изучении термокарстовых провалов и прогноз увеличения с помощью геоинформационных технологий, а также 3D-визуализация термокарстового провала Батагайка [5].

В статье проведен климатический анализ по данным Верхоянской метеостанции, и использованы новые методы и написаны блок-схемы для синхронизации обработки спутниковых снимков на двух ГИС-программах, таких как, IDRISI Selva и QGIS, и возможный прогноз на основе метода клеточного автомата для прогнозирования термокарстового провала Батагайка к 2038 году, с использованием ГИС-программ и разновременных спутниковых снимков Landsat 5(8). Сделана векторная карта эволюции термокарстового провала Батагай по следующим годам: 1991, 2006, 2019 и 2038 года [5].

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковые снимки, геомоделирование, термокарстовый провал, Батагайка, эволюция, машинное обучение, ГИС.

Yu. Ya. Matchitov^{1,2}, S.J.-P. Gadal^{1,2}, Yu. G. Danilov¹¹M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia²Aix-Marseille University, Marseille, France

E-mail: dan57sakha@mail.ru

E-mail: sebastien.gadal@univ-amu.fr

E-mail: match1304@mail.ru

GEOMODELING OF EVOLUTION PROCESSES OF THE THERMOKARST BATAGAY CRATER (BATAGAYKA) USING GIS

Abstract. Since the beginning of the 2000s, international and Russian scientists have carried out numerous studies of the dynamics of the thermokarst crater based on the analysis of space images taken at different times. Some of them indicate a direct relationship between the change in the crater's area and climate warming;

in others, such a relationship is not traced. At the same time, within the same territory, different researchers have observed contradictory results, which is due to the insufficient development of methods for aerospace studies of the dynamics of thermokarst depressions in the available works.

Therefore, it is important to develop a reliable methodology for studying the dynamics of the thermokarst crater using satellite images; experimental studies in various regions of the permafrost zone of Russia, carried out on the basis of a common methodology developed for all regions, will make it possible to identify the causes of changes and answer the question: may the thermokarst crater signal the response of the permafrost zone to the modern climate warming, which is no less a relevant task.

The goal was to identify effective methods in the study of the thermokarst crater and forecast its increase using geoinformation technologies, as well as to make a 3D visualization of the Batagayka thermokarst crater.

The article describes a climate analysis carried out according to the data of the Verkhoyansk weather station; new methods used; flowcharts written to synchronize the processing of satellite images on two GIS programs, such as IDRISI Selva and QGIS; and a possible forecast based on the cellular automaton method for predicting the thermokarst crater Batagayka by 2038, using GIS programs and multi-temporal satellite images Landsat 5(8). A vector map of the evolution of the Batagay thermokarst crater was made for the following years: 1991, 2006, 2019, and 2038.

Keywords: remote sensing, satellite imagery, modeling, thermokarst crater, Batagayka, evolution, machine learning, GIS.

Введение

На территории криолитозоны, занимающей до 65 % территории России, широкое развитие получили термокарстовые процессы, в результате которых формируются различные отрицательные формы рельефа, в частности, термокарстовые провалы. В условиях глобального потепления климата, которое особенно ярко выражено в Арктике и Субарктике, проявляется большой интерес к исследованию термо-денудационных процессов, как реакции криолитозоны на увеличение температуры. Однако труднодоступность территории, высокая степень ее заболоченности, отсутствие дорог и другой инфраструктуры усложняют проводить подобные исследования на местности, особенно в пределах больших территорий. В настоящее время стало возможно выполнять их с применением методов дистанционного зондирования Земли. Стало возможным изучение изменения формы и площадей, хорошо дешифрируемых на аэрокосмических снимках термокарстовых провалов, их динамики по космоснимкам высокого разрешения и использовать их как показатель активизации термокарстовых процессов и деградации мерзлоты [5].

Актуальна разработка надежной методики исследований динамики термокарстовых провалов по космическим снимкам, а экспериментальные исследования в различных участках криолитозоны России, проведенные на основе общей для всех районов разработанной методики, позволят обнаружить факторы изменений и ответить на вопрос – могут ли термокарстовые провалы служить индикаторами реакции криолитозоны на современное потепление климата, что является не менее актуальной задачей [5].

Территории севера России обладают огромными запасами полезных ископаемых и являются привлекательными районами для освоения этих ресурсов, что в свою очередь позволит увеличить количество рабочих мест, а также даст импульс для развития этих территорий [5].

При освоении северных территорий не стоит забывать о ее хрупком экологическом балансе, при нарушении которого могут возникнуть экологические проблемы [5].

Материалы и методы исследования

Объектом изучения является Батагайский мегапровал, расположенный в 10 км. юго-восточнее поселка Батагай (67°34'49" с. ш., 134°46'19" в. д.), в Верхоянском улусе Республики Саха (Якутия), вскрывший почти 80-метровую толщу синкриогенных отложений на склоне холма между горой Киргиллях (абс. выс. 612 м.) и горой Хатыннах [1].

В 60-х годах XX в. близ поселка Батагай существовал небольшой карьер глубиной 5 метров, где добывали песок для строительства. Со временем стенки карьера стали обшиваться и появился овраг. С 90-х годов овраг начал заметно увеличиваться. На сегодняшний день он превратился в огромный термокарстовый провал. Его размеры достигают: глубина 70-100 метров, длина и ширина более 1 км. [1]

Климат этой территории можно охарактеризовать по данным метеонаблюдений, проводящийся на метеостанции Верхоянск с 1888-г. Часть данных наблюдений имеется в открытом доступе сети Интернет.

Нами проведен анализ по многим показателям, которые приведены на рис. 1, на котором видно, что климат на севере Янского плоскогорья сухой и резко континентальный, с очень холодной зимой и относительно теплым летом.

20 июня 2020 года метеостанция в городе Верхоянске зафиксировала температуру воздуха, равную +38 градусам Цельсия, и превысила предыдущее максимальное значение на 4°C. Температура земной поверхности при этом составила 45 градусов Цельсия [3].

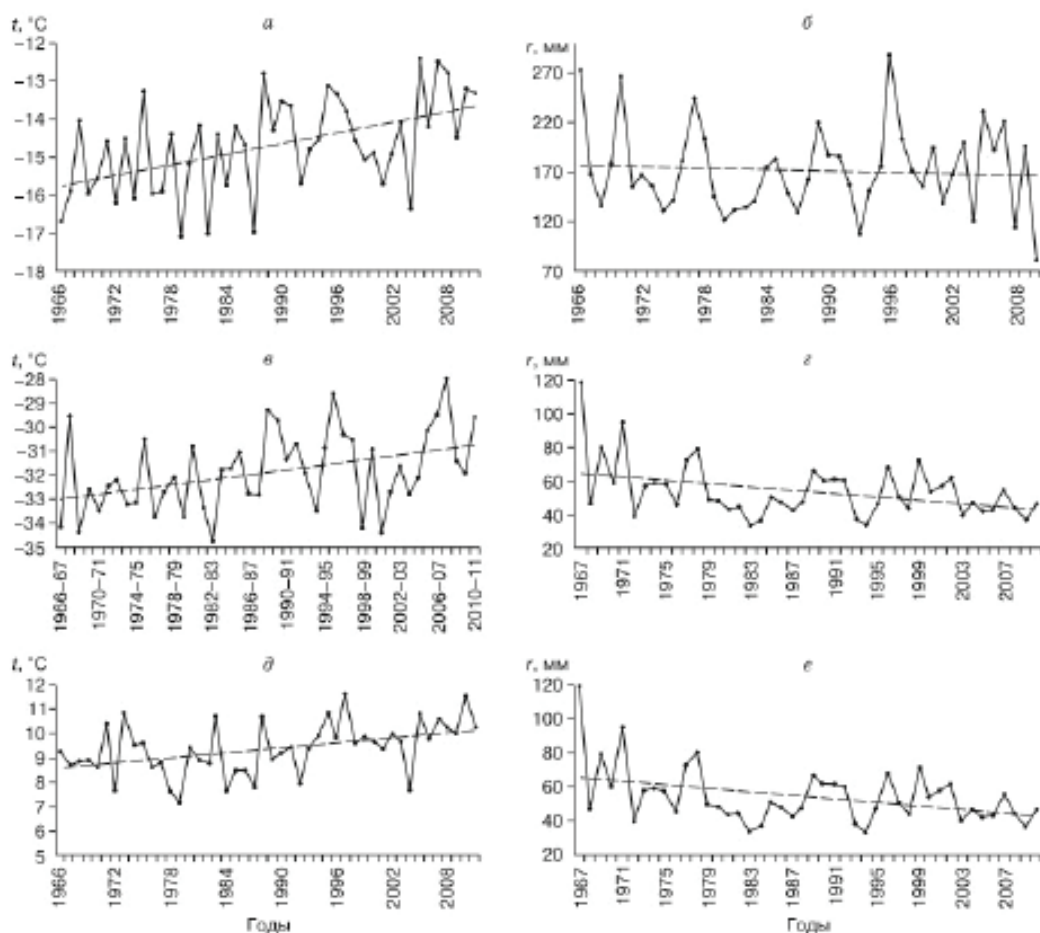


Рис. 1. Выборочные данные метеостанции Верхоянск в 1967–2010 гг.:

а – среднегодовая температура воздуха (t); б – годовые суммы атмосферных осадков (r); в – зимняя (октябрь–апрель) температура воздуха (t); г – зимние суммы атмосферных осадков (r); д – летняя (май–сентябрь) температура воздуха (t); е – летние суммы атмосферных осадков (r); сплошные линии – кривые изменения данных, штриховые прямые – их тренды [2]

Fig. 1. Sample data from Verkhoyansk weather station in 1967-2010:

а – annual mean air temperature (t); б – annual precipitation sums (r); в – winter (October-April) air temperature (t); г – winter precipitation sums (r); д – summer (May-September) air temperature (t); е – summer precipitation sums (r); solid lines – data change curves, dashed lines – their trends [2]

Анализ данных привел к следующим выводам, свидетельствующим об изменениях климата за холодный и теплый периоды:

- почти на 20 мм возросли суммы летних атмосферных осадков;
- более чем на 1°C увеличилась средняя летняя температура воздуха;
- более чем на 2°C увеличилась средняя зимняя температура воздуха;
- на 15 мм сократилась сумма зимних атмосферных осадков.

Геологическое строение этой территории определяется ее положением на западе Верхояно-Колымской складчатой области, где распространены темно-серые терригенные алевролиты и аргиллиты триаса [4]. Те и другие содержат слои песчаников, вместе с ними образуя сложно смятую и прорванную интрузивными породами осадочную толщу. На ней имеется глинистая кора выветривания, местами перекрытая породами неогена. Неоген состоит из глин с галькой и щебнем, галечников, суглинков, супесей, песков. Четвертичные отложения здесь залегают в виде прерывистого плаща, расположенного на более древних толщах скальных и дисперсных пород. Поверхность исследуемой части Янского плоскогорья имеет отчетливо выраженный ступенчатый рельеф.

Приведенный разрез интересен тем, что здесь слоистая песчаная толща содержит полосатости, под которыми понимаются грунтово-ледяные жилы особой структуры [2].

Для прогнозирования дальнейшего увеличения термокарстового провала Батагайка применен метод подвижных клеточных автоматов (МСА, от англ. movable cellular automata). Это метод вычислительной механики деформируемого твердого тела, основанный на дискретном подходе. Он объединяет преимущества метода классических клеточных автоматов и метода дискретных элементов. Важным преимуществом метода МСА является возможность моделирования разрушения материала, включая генерацию повреждений, распространение трещин, фрагментацию и перемешивание вещества. На рисунке 2 Представлена блок-схема, объединяющая для обработки спутникового снимка на двух ГИС программах, таких как IDRISI Selva и QGIS [5].

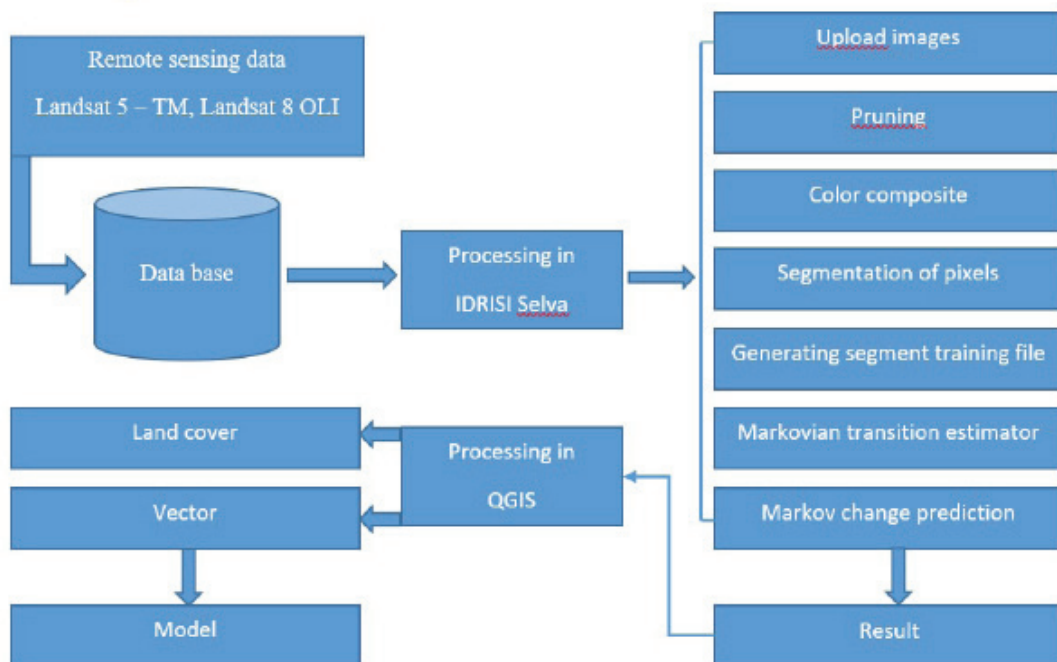


Рис. 2. Блок-схема клеточного автомата
Fig. 2. Block diagram of the cellular automaton

На рисунке 3 представлена модель термокарстового провала Батагайка и прилегающей к ней территории на прогнозируемое время 2038 года. Коричневым оттенком показан термокарстовый провал, зеленым – растительность, голубым – вода, серым – неплодородная почва, желтым – песок, черным – дорожная поверхность [5].

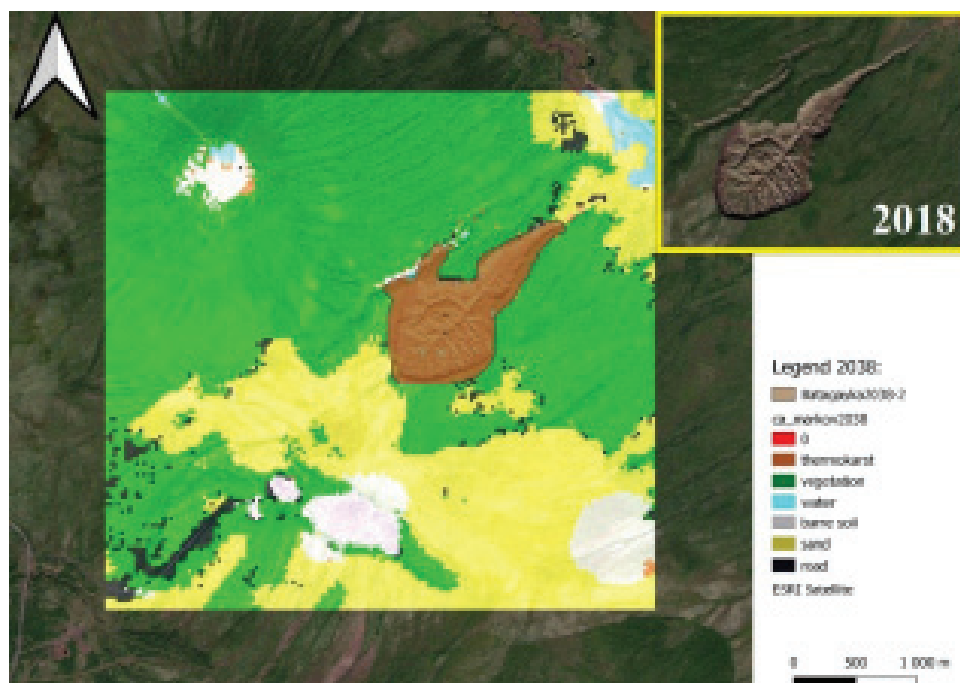


Рис. 3. Прогнозирование увеличения термокарстового провала с помощью метода клеточного автомата
Fig. 3. Prediction of thermokarst crater increase using the cellular automata method

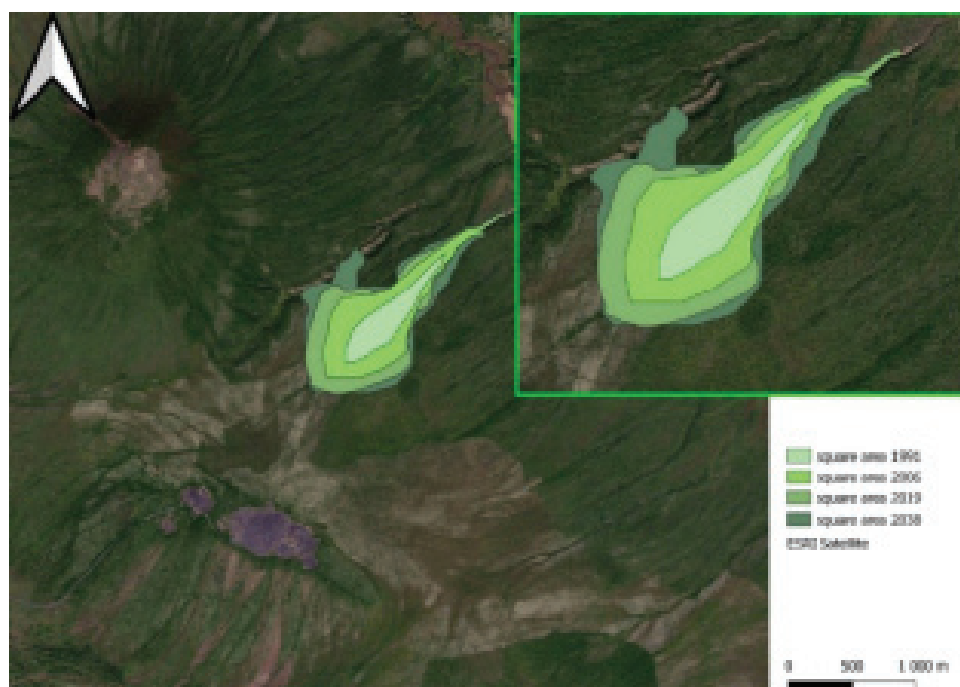


Рис. 4. Векторная карта эволюции термокарстового провала Батагайка
Fig. 4. Vector map of the evolution of the Batagaika thermokarst crater

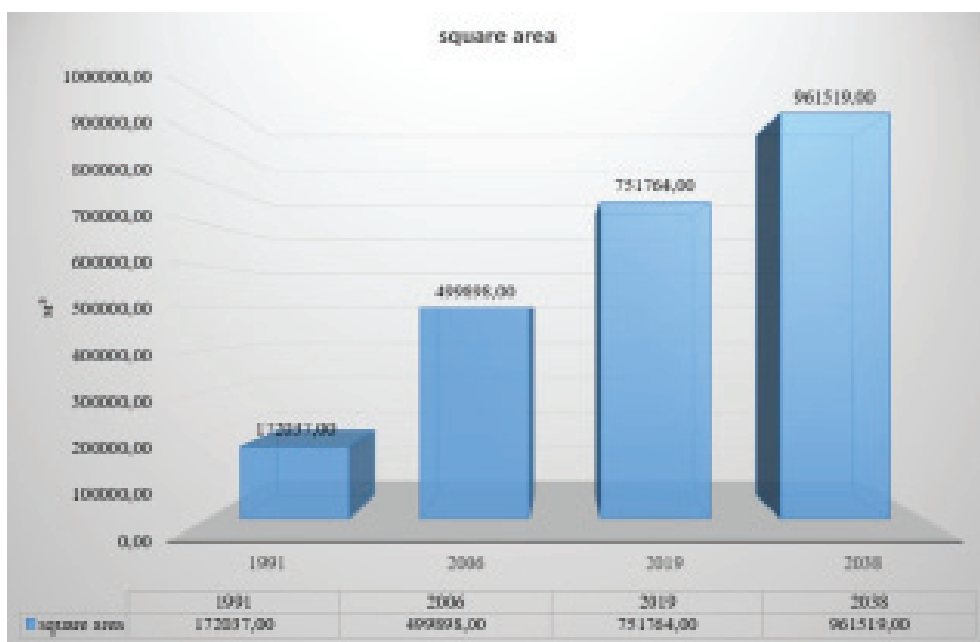


Рис. 5. Диаграмма площадей векторов с 1991 по 2038 годов (в м²)

Fig. 5. Diagram of vector areas from 1991 to 2038 (in m²)

По вышеизложенной модели за 18 лет площадь термокарстового провала увеличится еще на 122,400 м² [5] (рис. 6).



Рис. 6. 3D-модель термокарстового провала Батагайка (на 2018 год)

Fig. 6. 3D model of the Batagaika thermokarst crater (for 2018)

Закключение

Разработаны научные основы и основные принципы технологии применения аэрокосмических и картографических методов для изучения динамики термокарстового провала Батагайка.

В основе этой технологии лежит впервые разработанный метод исследования динамики термокарстового провала, основанный на цифровых технологиях обработки снимков и предполагающий одновременное дешифрирование изменений и измерение их параметров. Получение морфометрических данных по изменению осуществляется именно стереоскопическим измерительным дешифрированием разновременных снимков, которое реализуется методами фотограмметрии и позволяет производить крупномасштабное картографирование динамики наблюдаемого объекта. Метод позволяет определять пространственные изменения и исключает грубые ошибки измерений.

На основе метода клеточного автомата спрогнозирован возможный рост термокарстового провала к 2038 году и проведен сравнительный анализ увеличения площади в квадратных метрах [5].

Литература

1. Васильчук, Ю. К., Васильчук, Дж. Ю., Буданцева, Н. А., Васильчук, Инженерные изыскания в строительстве. Материалы Тринадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций // Батагайская едома – уникальный криолитологический объект. Москва: Издательство Геомаркетинг, 2017. – С. 294
2. Куницкий, В.В. Льдистые породы и термоденудация в районе посёлка Батагай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь) / В.В. Куницкий, И.И. Сыромятников, Л. Ширрмейстер и др. // Криосфера земли. – 2013. – Том XVII, № 1. – С. 56-68.
3. Гидрометцентр России // (режим доступа: <https://meteoinfo.ru/novosti/18324-vmo-priznala-novyj-temperaturnyj-rekord-v-arktike-38-c>)
4. Вдовина, Л.Г. «Батагайский провал» – современный термокарст, развивающийся в реальном времени / Л.Г. Вдовина // Геологический вестник Якутии. – 2017. – № 1(16). – С. 43-50.
5. Матчитов, Ю.Я., Гадаль, С.Ж.-П., магистерская диссертация «Геомоделирование процессов эволюции термокарстового провала Батагай (Батагайка) с использованием ГИС»

References

1. Ju. K. Vasil'chuk, Dzh. Ju. Vasil'chuk, N. A. Budanceva, A. K. Vasil'chuk Inzhenernye izyskanija v stroitel'stve. Materialy Trinadcatoj Obshherossijskoj konferencii izyskatel'skih organizacij // Batagajskaja edoma – unikal'nyj kriolitologicheskij ob'ekt. Moskva: Izdatel'stvo Geomarketing, 2017. – S. 294
2. Kunickij V.V. L'distye porody i termodenudacija v rajone posjolka Batagaj (Janskoe ploskogor'e, Vostochnaja Sibir') / V.V. Kunickij, I.I. Syromjatnikov, L. Shirrmejster i dr. // Kriosfera zemli. – 2013. – Tom XVII, № 1. – S. 56-68.
3. Gidrometcentr Rossii // (rezhim dostupa: <https://meteoinfo.ru/novosti/18324-vmo-priznala-novyj-temperaturnyj-rekord-v-arktike-38-c>)
4. Vdovina L.G. «Batagajskij proval» – sovremennij termokarst, razvivajushhij v real'nom vremeni / L.G. Vdovina // Geologicheskij vestnik Jakutii. – 2017. – № 1(16). – S. 43-50.
5. Matchitov Ju.Ja., Gadal' S. Zh.-P., masterskaja dissertacija «Geomodelirovanie processov jevoljucii termokarstovogo provala Batagaj (Batagajka) s ispol'zovaniem GIS»

Сведения об авторах

ДАНИЛОВ Юрий Георгиевич – заместитель ректора Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова по вопросам устойчивого развития арктических территорий, к.г.н., доцент, г.Якутск, Россия.

E-mail: dan57sakha@mail.ru

DANILOV Yury Georgievich – Deputy Rector on sustainable development of the Arctic territories, Ph.D., Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor, Yakutsk, Russia.

ГАДАЛЬ Себастьян Жан-Поль – проф., доктор географии, д.п.н., Университет Экс-Марсель, г. Марсель, Франция.

E-mail: sebastien.gadal@univ-amu.fr

GADAL Sebastien Jean-Paul – Professor, Doctor of Geography, Doctor of Education, Aix-Marseille University, Marseille, France.

МАТЧИТОВ Юрий Яковлевич – аспирант Эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: match1304@mail.ru

MATCHITOV Yury Yakovlevich – post-graduate student, Department of Ecology and Geography, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.