

— ГЕОКРИОЛОГИЯ —

УДК 551.345.1

DOI 10.25587/SVFU.2022.25.1.013

Н.А. Федоров, Н.И. Башарин

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

**АКТИВИЗАЦИЯ ТЕРМОКАРСТА ПОСЛЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ
НА ЯНСКОМ ПЛОСКОГОРЬЕ НА ПРИМЕРЕ
РАЙОНА г. ВЕРХОЯНСКА**

Аннотация. Термокарст является одним из ярких процессов, характеризующих динамику мерзлотных ландшафтов. Он представляет процесс проседания грунта вследствие оттаивания подземного льда. Под воздействием внешних факторов, таких как изменение климата, лесные пожары, вырубki лесов, нашествие шелкопряда и т.п., возникает ускорение процесса деградации многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Так же усугубляет ситуацию высвобождение парниковых газов, заточенные в ММГ, которые, в свою очередь, ускоряют процесс потепления климата. Изучение термокарста позволяет оценить масштабы деградации ММГ и провести количественную оценку влияния на потепление климата.

Рассмотрены проявления термокарстовых процессов на льдонасыщенных грунтах Янского плоскогорья. Приведены климатические условия исследуемого участка, а также обзорные геоморфологические и литологические особенности распространения грунтов на ней. Оценена деградация многолетней мерзлоты под воздействием лесных пожаров. Рассчитано оттаивание подземных льдов на участке «Чогоро» по классификации цифровой модели рельефа с помощью дешифрирования снимков с беспилотных летательных аппаратов. Основными методами работ являются ландшафтно-криоиндикационные и дистанционные. Обработка аэрофотоснимков велась в программных обеспечениях Topodrone, Agisoft metashape и ArcGIS. Приведен пошаговый метод подсчета объема вытаявшего льда на двух участках. Выявлены темпы деградации мерзлых грунтов для ключевых участков в пределах от 5,2 до 10,5 см/год. Объем вытаявшего льда составил 16364 м³ и 17985 м³.

Сравнительный анализ форм рельефа, полученными с цифровых моделей рельефа по данным аэрофотосъемки выявил хорошую корреляцию с цифровой моделью поверхности по данным космических снимков, что подтвердилось по данным полевых измерений. Объем вытаявшего льда указывает на масштабные высвобождения парниковых газов в атмосферу, ускоряя темпы глобального потепления. Темпы деградации ММГ после лесных пожаров на льдистых грунтах безусловно активизируются или ускоряются.

Ключевые слова: термокарст, подземный лед, мерзлотные ландшафты, мерзлота, расчёт объема льда, дистанционные методы, беспилотные летательные аппараты, просадки грунтов.

N.A. Fedorov, N.I. Basharin

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

**ACTIVATION OF THERMOKARST AFTER FOREST FIRES
ON THE YANSKY PLATEAU: THE CASE OF VERKHOYANSK AREA**

Abstract. Thermokarst is one of the striking processes that characterize the dynamics of permafrost landscapes. It represents the process of soil subsidence due to thawing of underground ice. Under the influence

ФЕДОРОВ Николай Александрович – к.г.н., в.н.с. Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. E-mail: fedorov@mpi.ysn.ru

FEDOROV Nikolay Alexandrovich – Candidate of Geographical Sciences, Leader Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS. E-mail: fedorov@mpi.ysn.ru

БАШАРИН Николай Ильич – м.н.с, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. E-mail: Nikolay_B89@mail.ru

BASHARIN Nikolay Ilyich – Junior researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. E-mail: Nikolay_B89@mail.ru

of external factors, such as climate change, forest fires, deforestation, the invasion of silkworms, etc., there is an acceleration of the process of degradation of permafrost soils. The situation is also aggravated by the release of greenhouse gases trapped in permafrost soils, which, in turn, accelerate the process of climate warming. The study of thermokarst makes it possible to assess the scale of degradation of permafrost and to quantify the impact on climate warming.

Manifestations of thermokarst processes on ice-saturated soils of the Yanskiy plateau are considered. The climatic conditions of the investigated area, as well as survey geomorphological and lithological features of the distribution of soils on it. The degradation of permafrost under the influence of forest fires has been assessed. The thawing of underground ice in the “Chogoro” area was calculated according to the classification of the digital elevation model using the interpretation of images from unmanned aerial vehicles. The main methods of work are landscape cryoindication and remote sensing. Aerial photographs were processed using Topodrone, Agisoft metashape and ArcGIS software. A step-by-step method for calculating the volume of thawed ice in two areas is presented. The rates of degradation of frozen soils for key areas were revealed in the range from 5.2 to 10.5 cm / year. The volume of melted ice was 16364 m³ and 17985 m³.

Comparative analysis of landforms obtained from digital elevation models based on aerial photography data revealed a good correlation with a digital surface model based on satellite imagery data, which was confirmed by field measurements. The amount of ice that has melted indicates large-scale releases of greenhouse gases into the atmosphere, accelerating the rate of global warming. The rate of degradation of permafrost soils after forest fires on icy soils is undoubtedly intensified or accelerated.

Keywords: thermokarst, underground ice, permafrost landscapes, permafrost, ice volume calculation, remote sensing methods, unmanned aerial vehicles, soil subsidence.

Введение

Термокарст является одним из ярких процессов, характеризующих динамику мерзлотных ландшафтов. Он представляет процесс проседания грунта вследствие оттаивания подземного льда. Под воздействием внешних факторов, таких как изменение климата, лесные пожары, вырубки лесов, нашествие шелкопряда и т.п., возникает ускорение процесса деградации многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Так же усугубляет ситуацию высвобождение парниковых газов, заточенные в ММГ, которые, в свою очередь, ускоряют процесс потепления климата. Изучение термокарста позволяет оценить масштабы деградации ММГ и провести количественную оценку влияния на потепление климата.

В настоящее время, по всей Якутии наблюдается активизация термокарста. В условиях потепления климата, деградирует переходный слой к ММГ, защищающий их от избыточного теплопереноса с поверхности в мерзлые грунты, провоцируя проседания в виде типичных для полигонально-жильных льдов – термокарстовых форм рельефа. На территории Республики Саха (Якутия) на протяжении более 30 лет ведутся мониторинговые наблюдения за развитием термокарста [1]. Оценивается влияние на мерзлотные условия растительного покрова, рельефа, увлажнённости, литологического состава грунтов, а также климатических факторов, таких как среднегодовые температуры воздуха и среднемесячные атмосферные осадки.

Изучение термокарстового процесса ведется вплотную с мерзлотно-ландшафтными исследованиями, так как непосредственную роль в развитии данного процесса оказывают природно-территориальные комплексы (ПТК) [2]. Было отмечено, что термокарст проявляется только лишь в пределах развития разновозрастных ледовых комплексов, наиболее широко распространенных на территории Центральной Якутии. Так же научные исследования в основном ведутся непосредственно на территории центральной Якутии [3-4].

За пределами Центральной Якутии широкую известность получил Батагайский провал на Янской плоскогорной провинции в зоне сплошного распространения ММГ с преобладанием горноредколесных природных комплексов [5-7]. В пределах данной провинции, при осмотре участков, пораженных лесными пожарами, были обнаружены уникальные территории в тысячи гектаров с развитием термокарстовых форм рельефа.

Цель статьи – оценка деградации многолетней мерзлоты под воздействием лесных пожаров. Поставленная задача: расчёт оттаивания подземных льдов на участке «Чогоро» с помощью классификации цифровой модели рельефа (ЦМР) с помощью дешифрирования снимков с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Собранный материал включает в себя полевые данные с исследуемого участка методами мерзлотно-ландшафтной съемки, а также общедоступный материал с баз геоданных космических спутников Landsat и Sentinel. В работе использованы климатические данные метеорологической станции Верхоянск.

Исследуемый участок

Верхоянск – один из самых холодных территорий в мире. По данным метеостанции Верхоянск (рис. 1), среднегодовая температура воздуха варьируется в пределах от -17 до -12 °С. Климат на Янском плоскогорье сухой и резко континентальный, с очень холодной зимой и относительно теплым летом.

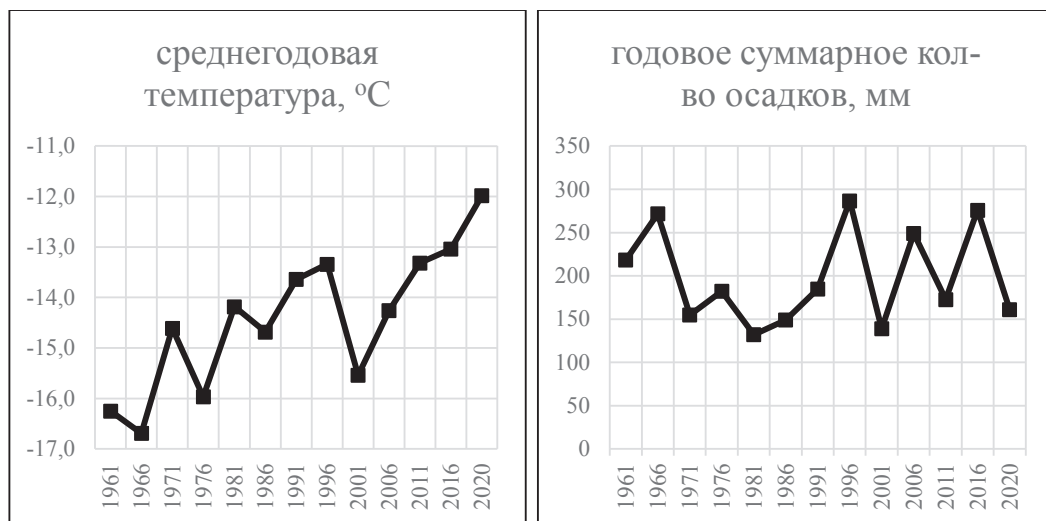


Рис. 1. Климатические данные метеостанции Верхоянск

Геологическое строение этой территории определяется ее положением на западе Верхояно-Колымской складчатой области, где распространены темно-серые терригенные алевролиты и аргиллиты триаса [8]. 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 (табл. 1). Квартер здесь залегает в виде прерывистого плаща, расположенного на более древних толщах скальных и дисперсных пород.

Таблица 1 – Описание геокриологического разреза участка Чогоро в лесном массиве

Номер слоя	Глубина, м	Краткая характеристика пород
1	0,0-4,6 см	лесная подстилка.
2	4,6-80 см	сезонноталый слой, состоящий из супеси
3	80-100 см	мерзлая толща представлена супесью бурого цвета с зеленоватым оттенком. В интервале 95-100 см слоистая криотекстура, слои льда шириной до 0,5 см. Льдистость 5-10 %.
4	100-110 см	ледогрунт супесчаный. Линзовидная криотекстура. Льдистость 40-50 %.
5	110-135 см	ледогрунт суглинистый. Слоистый, линзовидной криотекстуры. Льдистые прослои до 0,5 см, грунтовые прослои от 3 мм до 10 мм. Льдистость 60 %.
6	135-143 см	лед 90 % (ледогрунт) с массивной криотекстурой.
7	143-157 см	Ледогрунт, льдистость до 80 %. Полосчатость преимущественно горизонтальная. Наблюдаются вертикальные прожилки.

Продолжение табл. 1

8	157-176 см	до 161 см ледогрунт с льдистостью до 60 %, после до 170 см ледогрунт косослоистой криотекстуры. Льдистость до 40 %. Ниже по разрезу наблюдается уменьшение льдистости. До 176 см суглинок мерзлый, массивный.
9	176-197 см	слабольшедистый суглинок, льдистость до 5 %, массивный.
10	197-234 см	слабольшедистый суглинок массивной криотекстуры, льдистость до 5 %. 203-234 см суглинок мерзлый массивной криотекстуры. Имеются включения органических остатков в виде бурых корешков и черных обугленных корешков.
11	234-248 см	слабольшедистый суглинок. Криотекстура косослоистая. Льдистость до 5 %.
12	248-266 см	суглинок мерзлый. Массивной криотекстуры. Включения детрита.
13	266-280 см	суглинок твердомерзлый. По всему интервалу бурые включения лимонита совместно с черным детритом. Цвет суглинка бурый с ржавым оттенком.
14	280-300 см	суглинок мерзлый. Микролинзовидная криотекстура. Продолжаются включения лимонита и детрита.
15	300-322 см	от 300 до 306 см твердомерзлый суглинок массивной криотекстуры. От 306 до 312 см ледогрунт льдистостью до 50 %. От 312 до 322 см массивный твердомерзлый суглинок бурого цвета с желтоватым оттенком. Наблюдаются включения органических остатков.
16	322-338 см	ледогрунт мощностью (???) 30 %. Вмещающим грунтом является суглинок с ржавым оттенком. По мере углубления увеличивается льдистость.
17	338-356 см	от 338 до 345 см льдистый суглинок с льдистостью 10-15 % с гнездовидной криотекстурой. От 345 до 356 см твердомерзлый суглинок с массивной криотекстурой, имеется микрослоистость с небольшим наклоном.
18	356-363 см	сильнольдистый суглинок с косослоистой текстурой. Льдистость 20-30 %.

Уплогненные вершины – вершины плоскогорья – являются участками сильнотрещиноватых пород. Перекрываются они элювиальным щебнем с корками и гнездами льда. Среди такого элювия имеются отдельные (обычно гранитные) скалы – кигилиахи, возвышающиеся над щебнем на 1–10 м и более [9]. Эти скалы свидетельствуют, что выветривание здесь значительно медленнее разрушает интрузивные породы, чем вмещающие их осадочные образования. Склоны гор средней крутизны и пологие, часто осложняются площадками криопланационных террас. Последние секут складки скального основания, в которое они врезаны, и представляют собой реликтовые формы в лесном поясе Янского плоскогорья.

Подгорная равнина (преобладающие абсолютные высоты 200–250 м) отличается неглубоким залеганием пород неогена. Эта увалистая равнина занимает в геоморфологическом плане промежуточное место между областью речных террас и областью горных склонов (рис. 2). Отдельные овраги расчлениают поверхность подгорной равнины. Иногда на ней находятся аласы – сточные и бессточные термокарстовые котловины с озерами и болотами.

Аласы на подгорной равнине и уплогненность вершин гор в области складчатого триаса и смежные с ними поверхности выравнивания, неактивные площадки криопланационных террас и полигональные формы на склонах гор определяют особенности рельефа этой территории (рис. 3). Их можно объяснить ее положением в одной из наиболее холодных частей Восточной Сибири, где формирование криолитозоны началось еще в позднем плиоцене [10] и происходило, судя по всему, под влиянием ледников хр. Черского и Верхоянского хребта. Влияние этих ледников, вероятно, усиливалось, когда от них поступали значительные объемы ледниковых вод. Однако процессы стока и роль таких вод в развитии криолитозоны Янского плоскогорья пока что слабо изучены.

В одном из аласов расположен исследуемый участок (рис. 4). Растительность угнетена масштабными лесными пожарами, проходившими в 2002 и 2013 годах. Вся территория является горельником, полностью восстановившийся после пожаров. Лес представлен лиственницей Каяндера с подростом тощей и кустарниковой березки. Напочвенный покров лишайниково-мохово-брусничный. На лугу растительность представлена разнотравно-злаковыми ассоциациями с ерниками, а также молодой лиственницей от 5 до 13 лет. Грунты нарушены термокарстовыми формами рельефа и сильно увлажнены.

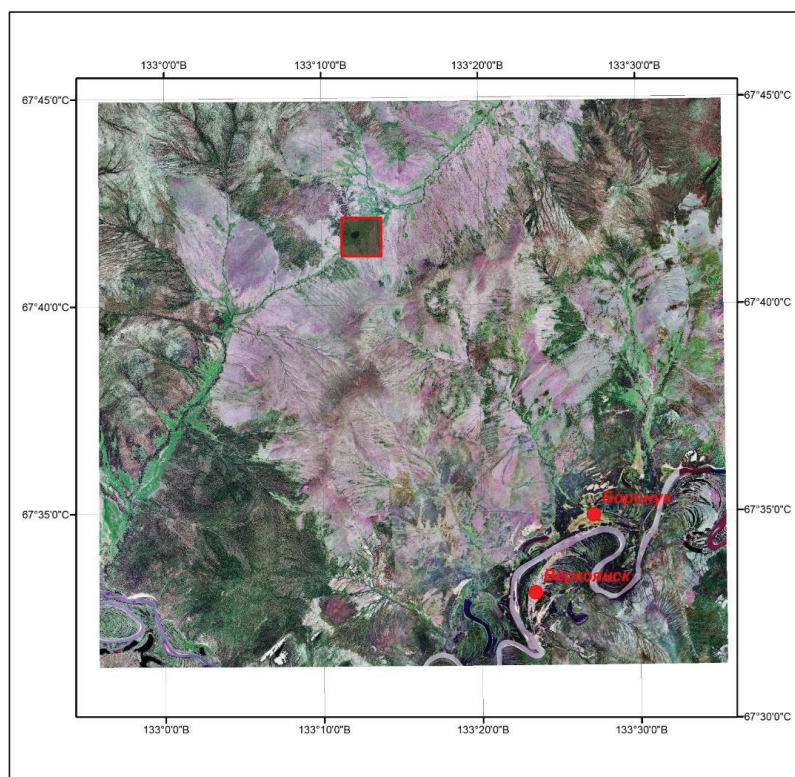


Рис. 2. Территория исследуемого участка. В красной рамке – участок «Чогоро»

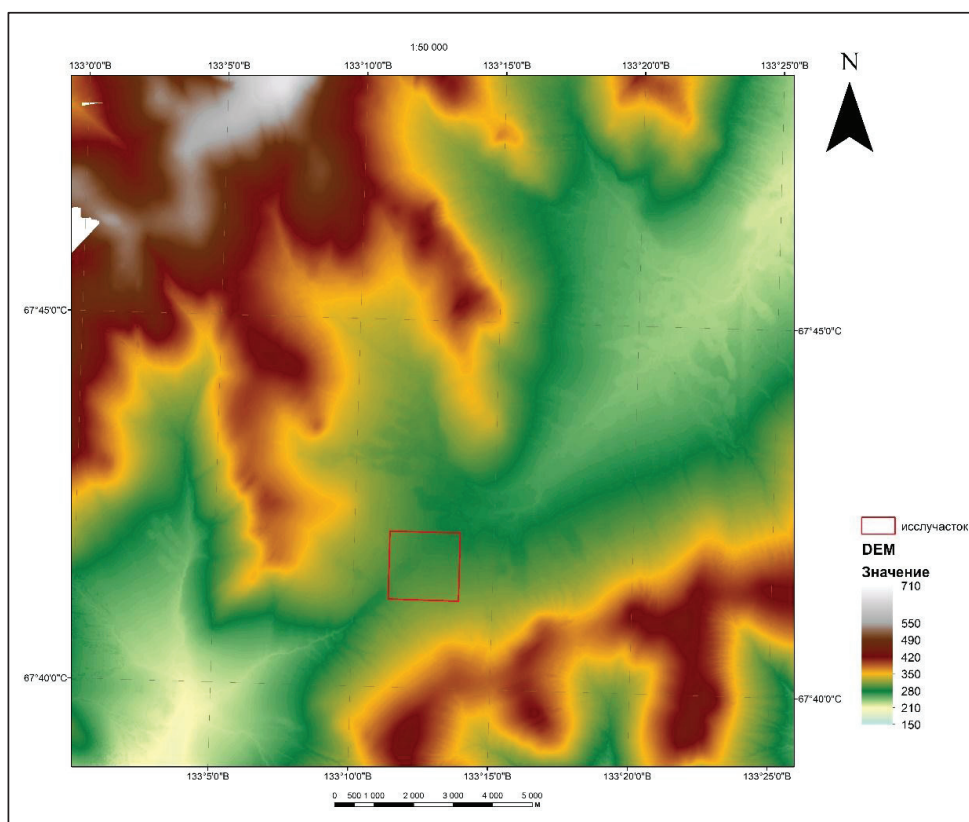


Рис. 3. Формы рельефа участка «Чогоро» по данным ESRI ArcticDEM

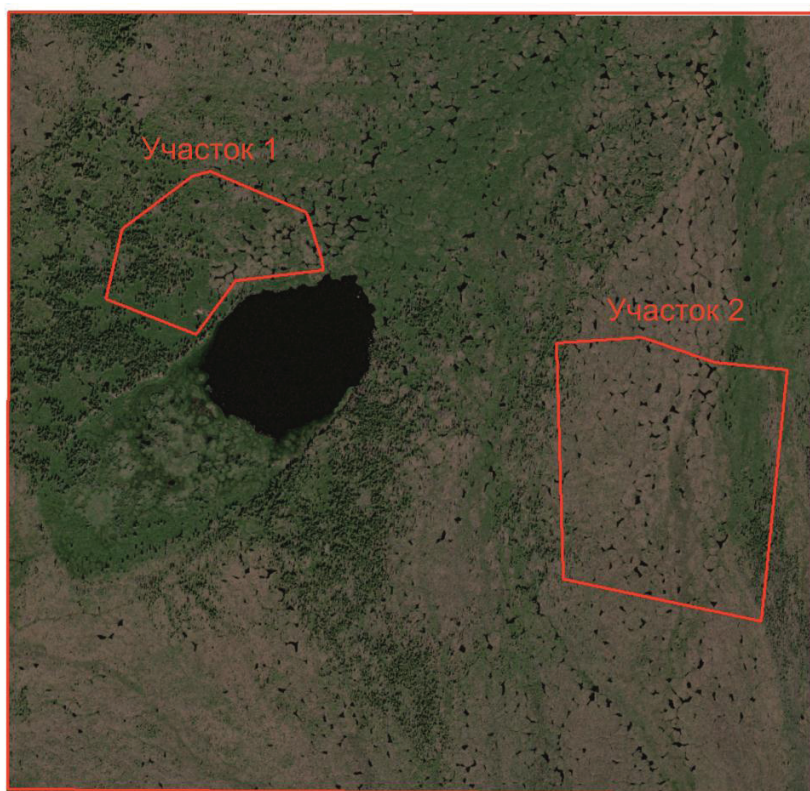


Рис. 4. Участок «Чогоро». Красными рамками выделены контрольные участки

Материалы и методы исследования

Основными методами работ являются ландшафтно-криоиндикационные и дистанционные. Полевые исследования проводились в сентябре 2021 года. Были пробурены две скважины в лесном массиве и на разнотравно-злаковом лугу в центре полигонов термокарстовых образований. Было произведено описание керна.

Установлены четырехканальные логгеры на глубину до 3,2 м для дальнейшего наблюдения за температурными режимами ПТК. Помимо всего, была проведена нивелирная съемка, в качестве заверяющего метода для моделирования формы рельефа. Ортофотопланы ключевых участков были сняты с помощью БПЛА (DJI Phantom 4 Pro) с дополнительными геодезическими модулями от «Торподrone», для более точной и детальной пространственной привязки точек камер при обработке аэрофотоснимков. С помощью данных методов мы добились пространственного разрешения в 3 см/пикс с высоты полета 150 м. Так же при построении карты высот по данным материалам в программной среде Agisoft Metashape была проведена классификация облака точек с фильтрацией земной поверхности, чтобы построить ЦМР. Добившись максимальной точности и детальности, весь материал был перенесен в программную среду ArcGIS где был произведен пространственный анализ форм рельефа.

Согласно поставленной задаче, а именно расчёту оттаивания подземного льда, мы придерживались следующего принципа: поверхностные просадки отражают объем вытаявшего льда в грунте. Это означает, что первоначальная поверхность, а именно ее относительная высота, была распространена равномерно на всю площадь исследуемой территории, без сети просадок по полигонально-жильным льдам. Чтобы рассчитать объем вытаявшего льда, мы воспользовались инструментом насыпи/выемки в Spatial analyst в ArcMap.

Порядок расчёта объема льда проводится в следующей последовательности (рис. 5): 1) Создать точки высот по наивысшим точкам территории (по вершине полигонов); 2) Создать по точкам TIN поверхность, и конвертировать его в растр; 3) извлечь из созданного растра расчётный участок; 4) создать поверхность Насыпи/выемки по вычету первичной поверхности

и отснятой с БПЛА ЦМР; 5) Рассчитать геометрию и подсчитать объем, согласно атрибутивной таблице созданной поверхности.

Была предпринята попытка провести ту же процедуру с уже имеющимся алгоритмом расчёта вытаявшего льда с ЦМР от ArcticDEM. Данный вид топографической поверхности не является ЦМР, а цифровой моделью местности, так как поверхность данной модели строится поверх кроули растительности, а их классификацию провести не удалось.

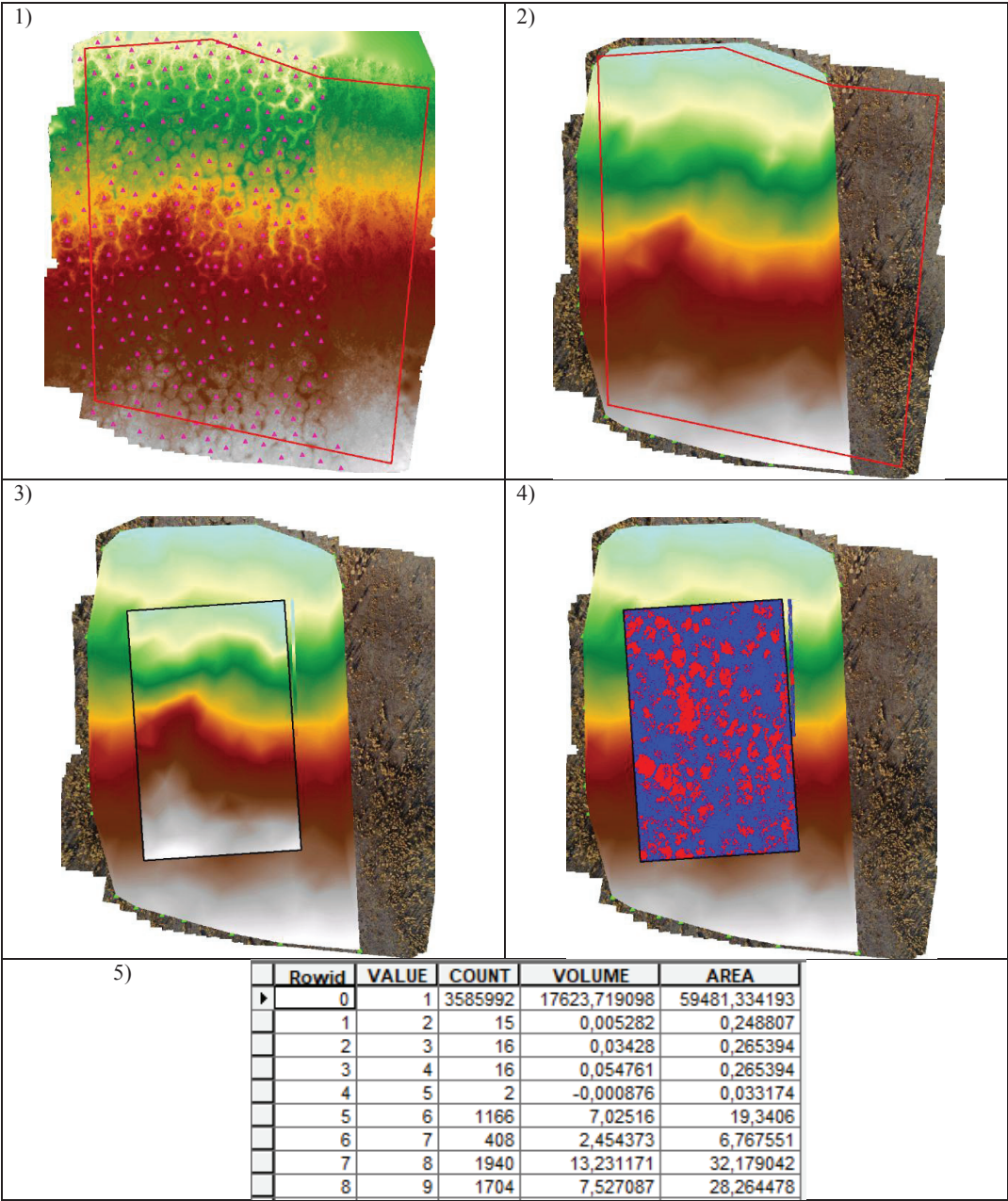


Рис. 5. Методика расчёта объема вытаявшего льда на примере восточного контрольного участка

Дистанционные методы были отобраны в общедоступных базах космических снимков порталов <https://earthexplorer.usgs.gov/>, <https://www.sentinel-hub.com/>, <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>. Так, в ходе работ были использованы снимки со спутников Landsat 7 с разрешением 30 м для дешифрирования зон лесных пожаров в 2002 и 2013, Sentinel-2 для выявления диф-

ференцированных индексов растительности и влажности поверхности), Worldview-3 для получения ЦМР в разрешении 2 метра от 19.06.2018.

Результаты

Участок 1 находится на пологом склоне восточной экспозиции седловины плоскогорья. Полностью подвержен термокарстовому процессу, даже в лесном массиве (см. рис 6а). Следы пожаров, проходивших в 2002 и 2013 годах, наблюдаются в виде обугленных и обваленных лиственниц. В низинах трещин проседания установлена высокая обводненность, вплоть до образования мелких водоемов. Рельеф нарушен, глубина вреза трещин колеблется в пределах от 0,5 метров до 2 метров.

На участке почти полностью восстановлена растительность. По нашему мнению, процесс термокарста здесь остановился на всей территории участка, кроме мест, где установились постоянные водоёмы. В них же процесс будет продолжаться, образуя талики, с охватом соседних водоёмов. Нивелирный ход подтвердил характер рельефа с погрешностью в 30 см для моделей рельефа (рис. 6б). По нескольким точкам значения высот совпали.

Подсчёты объемов вытаявшего льда на данном участке показали следующие параметры: объем вытаявшего льда составил 16364 м^3 , площадь ареала термокарстовых просадков составила 3,2 га, относительный объем вытаявшего льда составил $0,51 \text{ м}^3/\text{м}^2$. Усредненная скорость проседания по максимальным значениям составила 10,5 см/год (за период с 2002 по 2021 гг.).

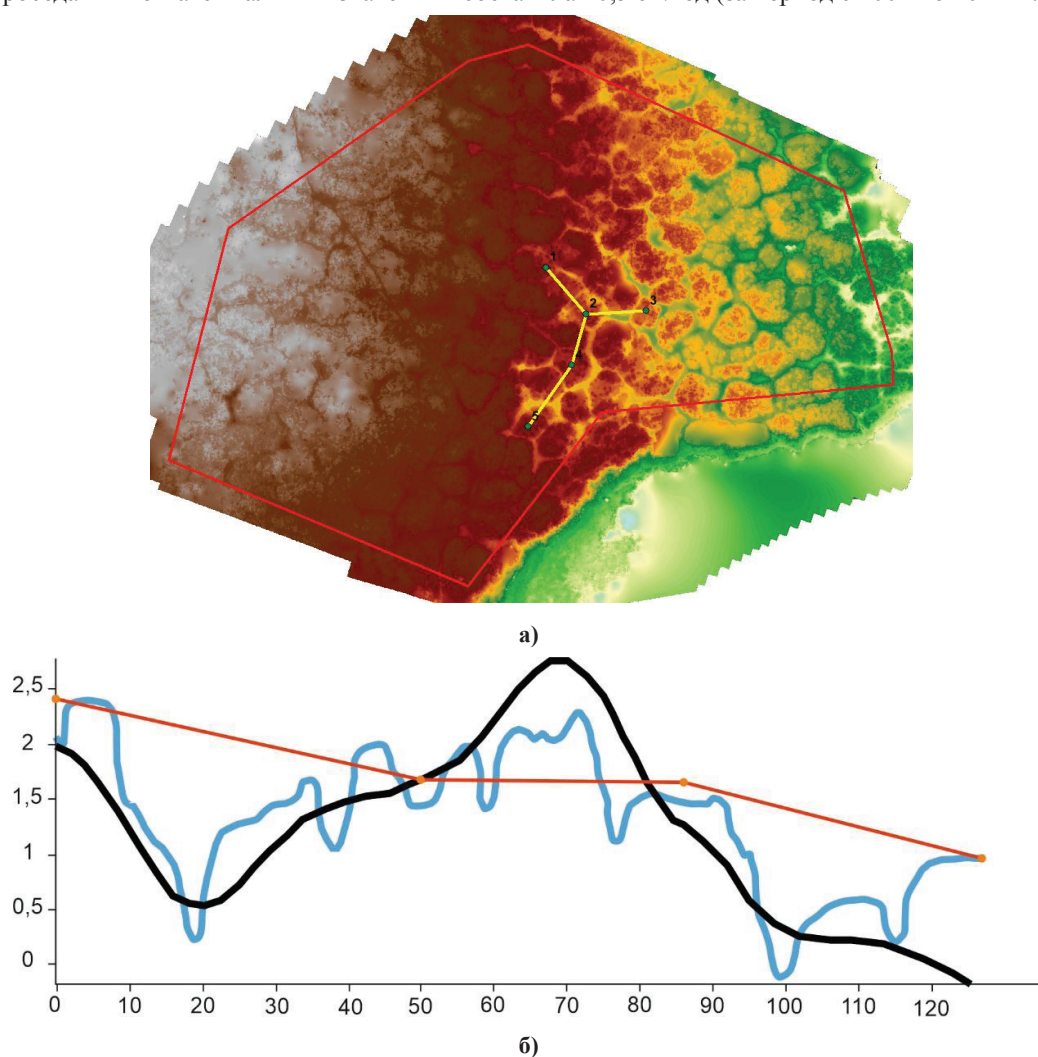


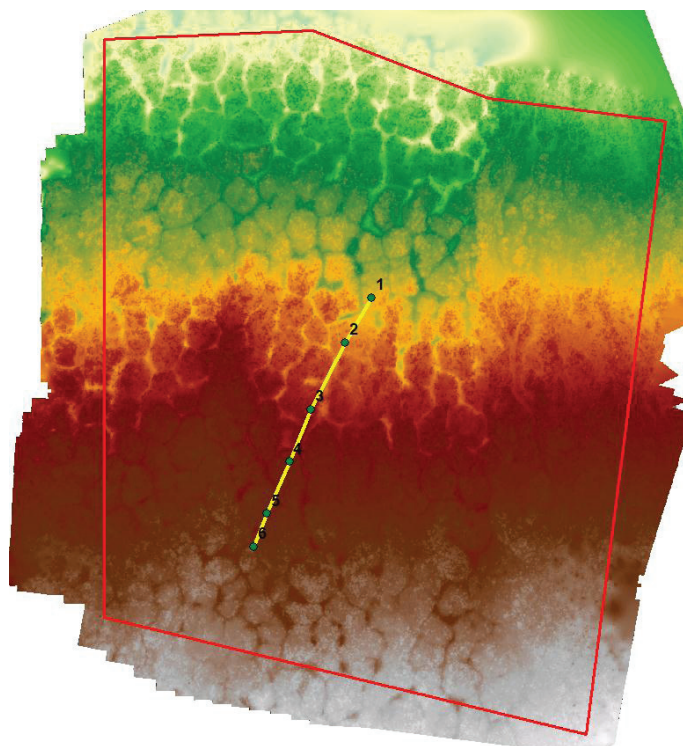
Рис. 6. а) Профили рельефа по нивелирному ходу (на схеме – желтая линия). б) Красной линией – нивелирный ход по 4 точкам, синей – ЦМР БПЛА, черной – ArcticDEM. Значения даны в метрах

Участок 2 находится на пологом склоне северной экспозиции на открытом разнотравно-злаковом лугу с повышенной влажностью грунтов. Просадки выражены сетью полигональных форм рельефа (рис. 7а). Примечательный факт обнаружен в ходе дешифрирования аэрофотоснимков: восточная часть участка имеет чёткую границу ненарушенной поверхности. Растительный покров на ней представлен кочкарником и тощей березкой; на юго-восточной части участка имеется зрелый лиственный лес. На лугу в центральной части участка выражены разнотравье и злаки с голубикой и ерником. По форме рельефа участок напоминает ложбину стока временных водотоков с широкой и пологой долиной.

Наблюдаются восстановительные сукцессионные процессы, проходившие в два различных периода. Подсчёт древесных колец молодых лиственниц показал, что их возраст соответствует 5-ти и 13-ти годам, что соответствует периодам проходивших здесь лесных пожаров. Сопоставив возраст деревьев и время распространения лесных пожаров, активное развитие сукцессионных процессов отложилось на 2-3 года с момента событий.

По сравнению с участком 1, просадки здесь в основном не достигают таких глубин, а изменяются в районе от 0,5 до 1 метра (рис. 7б), и только в обводненных межполигональных западинах достигают 2-метровой глубины.

Нивелирный ход достаточно хорошо совпал с ЦМР с БПЛА, погрешность колеблется в пределах 10 см. Согласно пространственному анализу, объем вытаявшего льда составил 17985 м³. Площадь просадок составил 6,1 га. Относительный объем вытаявшего льда – 0,29 м³/м². За период с 2002 по 2021, усредненная скорость проседания составила 5,2 см/год.



а)

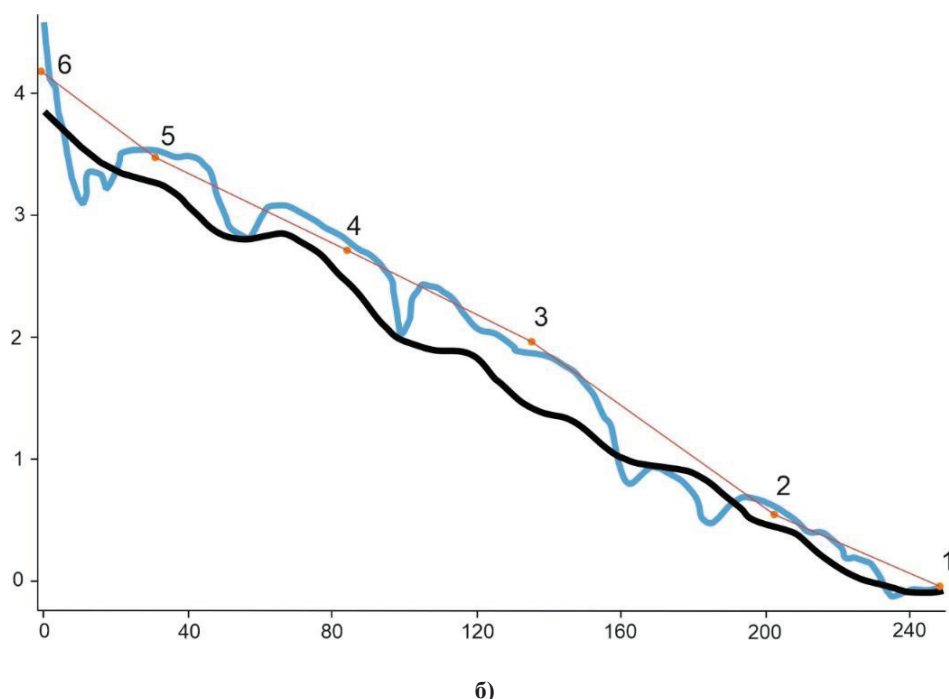


Рис. 7. Профили рельефа по нивелирному ходу (на схеме – желтая линия). Красной линией – нивелирный ход, синей – ЦМР БПЛА, черной – ArcticDEM. Значения даны в метрах.

В таблице 2 представлено сравнение показателей оттайки льда:

Таблица 2 – Сравнение параметров объемов вытаявшего льда на участках

Site name	Volume, м ³	Area of subsidence, м ² (га)	V/S, м ³ /м ²
Участок 1	16364	31909 (3.2)	0,51
Участок 2	17985	61474 (6.1)	0,29

Обсуждение

Темпы оттаивания сравнимы с Центральной Якутии (Федоров, 2020). Отличие в том, что исследования в Центральной Якутии, проводились на техногенных и нарушенных участках. Здесь же мы наблюдаем естественный процесс просадки грунтов, вследствие лесных пожаров. Можно утверждать, что последствия лесных пожаров сопоставимы с антропогенными нарушениями, а именно с удалением естественного залегания растительного покрова.

Обращаем внимание, что площадь распространения лесных пожаров на прилегающей территории исследования во много раз превышает площадь исследуемых участков. Если разработать методику расчёта вытаявшего льда с помощью топографических данных с ArcticDEM, то будет возможным проработать всю нарушенную территорию, и указать степень влияния на содержание парниковых газов от процесса оттаивания подземного льда.

Мы видим, что даже на такой маленькой площади объем вытаявшего льда составил колоссальные значения, то к участкам в более чем 100 гектар необходимо отнестись с повышенным вниманием.

Следующее что бы мы хотели отметить, так это то, что на территории с преобладанием лесных массивов, темпы деградации отказались быстрее, чем на луговых равнинах, хотя общепринято, что в лесу деградация ММГ значительно замедляется. Возможно, это связано с тем, что период сукцессии с 2002 по 2007 совпал с большим количеством атмосферных осадков, что высокая влажность грунтов не позволила замедлить процесс деградации ММГ под воздействием

сукцессионных процессов, и восстановлению растительного покрова. Так же этот самый период совпал с ростом среднегодовых температур воздуха.

Луговые же территории полностью восстановились после пожаров, и процесс термокарста, по всей видимости, приостановлен.

Заключение

ЦМР с БПЛА и ЦМП от ArcticDEM выявили хорошую корреляцию между собой, что подтвердилось полевыми измерениями. Полученные материалы позволили с высокой точностью рассчитать объем вытаявшего льда, по формам и размерам поверхностных провалов.

Было установлено и принято, как факт, что темпы деградации ММГ после лесных пожаров на льдистых грунтах, безусловно, активизируются или ускоряются. Колоссальные объемы вытаявшего льда указывают на масштабные высвобождения парниковых газов в атмосферу, ускоряя темпы глобального потепления.

Исследуемая территория требует большего внимания со стороны научного общества, для оценки воздействия и влияния многолетней мерзлоты на изменение климата.

Литература

1. Федоров А.Н. Эволюция и динамика мерзлотных ландшафтов Якутии: автореф. дисс. д.г.н. – Федоров Александр Николаевич. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2020. – 37 с.
2. Fedorov A.N., Gavriliev P.P., Konstantinov P.Y., Hiyama T., Iijima Y. and Iwahana G. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia // *Ecohydrology*. – 2014a. – Vol. 7, Issue 2. – P. 188–196. doi: 10.1002/eco.1378.
3. Босиков Н.П. Эволюция аласов Центральной Якутии. – Якутск: ИМЗ, 1991. – 127 с.
4. Гаврильев П.П. Реакция пород ледового комплекса Центральной Якутии на потепление климата / П.П. Гаврильев, И.С. Угров // *Криосфера Земли*. – 1999. – том 13, № 1. – С. 24–30.
5. Murton J.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, Korzun J.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. – 87, 2. – P. 314–330.
6. Opel T., Murton J.B., Wetterich S., Meyer H., Ashastina K., Gunther F., Grotheer H., Mollenhauer G., Danilov P.P., Boeskorov V., Savvinov G.N., and Schirrmeister L. 2019. Past climate and continentality inferred from ice wedges at Batagay megaslump in the Northern Hemisphere's most continental region, Yana Highlands, interior Yakutia // *Climate in Past*. – 2019. – 15,4. – P. 1443–1461. doi: 10.5194/cp-15-1443-2019.
7. Васильчук Ю.К. Изотопный состав углерода и полиарены в педогенном материале ледяных жил Батагайской едомы (Якутия) / Ю.К. Васильчук, А.Д. Белик, Н.А. Буданцева, А.Н. Геннадиев, Д.Ю. Васильчук // *Почвоведение*. – 2020. – № 2. – С. 188–198.
8. Вдовина Л.Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. – Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2002. – 1 л.
9. Мурзин Ю.А. Кигиляхи Якутии / Ю.А. Мурзин // *Природа*. – 2004. – № 5. – С. 54–57.
10. Гриненко О.В., Сергеенко А.И., Белолуцкий И.Н. Палеоген и неоген Северо-Востока России. Ч. II. Региональная стратиграфическая схема палеогеновых и неогеновых отложений Восточной Якутии и Объяснительная записка к ней. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1998. – 60 с.

References

1. Fedorov A.N. Evolyuciya i dinamika merzlotnyh landshaftov YAKutii: avtoref. diss. d.g.n. – Fedorov Aleksandr Nikolaevich. – Yakutsk: IMZ SO RAN, 2020. – 37 s.
2. Fedorov A.N., Gavriliev P.P., Konstantinov P.Y., Hiyama T., Iijima Y. and Iwahana G. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia // *Ecohydrology*. – 2014a. – Vol. 7, Issue 2. – P. 188–196. doi: 10.1002/eco.1378.
3. Bosikov N.P. Evolyuciya alasov Central'noj YAKutii. – Yakutsk: IMZ, 1991. – 127 s.

4. Gavril'ev P.P. Reakciya porod ledovogo kompleksa Central'noj YAkutii na poteplenie klimata / P.P. Gavril'ev, I.S. Ugarov // Kriosfera Zemli. – 1999. – tom 13, № 1. – S. 24–30.
5. Murton J.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, Korzun J.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. – 87, 2. – P. 314-330.
6. Opel T., Murton J.B., Wetterich S., Meyer H., Ashastina K., Gunther F., Grotheer H., Mollenhauer G., Danilov P.P., Boeskorov V., Savvinov G.N., and Schirrmeister L. 2019. Past climate and continentality inferred from ice wedges at Batagay megaslump in the Northern Hemisphere's most continental region, Yana Highlands, interior Yakutia // Climate in Past. – 2019. – 15,4. – P. 1443-1461. doi: 10.5194/cp-15-1443-2019.
7. Vasil'chuk YU.K. Izotopnyj sostav ugleroda i poliarenny v pedogenom materiale ledyanyh zhil Batagajskoj edomy (YAkutiya) / YU.K. Vasil'chuk, A.D. Belik, N.A. Budanceva, A.N. Gennadiev, D.YU. Vasil'chuk // Pochvovedenie. – 2020. – № 2. – S. 188-198.
8. Vdovina L.G. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:200 000. – Sankt-Peterburg: Izd-vo VSEGEI, 2002. – 1 l.
9. Murzin YU.A. Kigilyahi YAkutii / YU.A. Murzin // Priroda. – 2004. – № 5. – S. 54–57.
10. Grinenko O.V., Sergeenko A.I., Belolyubskij I.N. Paleogen i neogen Severo-Vostoka Rossii. CH. II. Regional'naya stratigraficheskaya skhema paleogenovyh i neogenovyh otlozhenij Vostochnoj YAkutii i Ob'yasnitel'naya zapiska k nej. – YAkutsk: Izd-vo YANC SO RAN, 1998. – 60 s.