

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ ЛЕНО-АМГИНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

П.В. Ефремов

Институт мерзлотоведения СО РАН им. П.И. Мельникова
Якутск, Российская Федерация
pvefremov@mpi.ysn.ru

Аннотация

В статье рассмотрено влияние потепления климата на развитие термокарстовых процессов на пахотных землях Лено-Амгинского междуречья. В итоге многие пашни из сельхозугодий превращаются в заброшенные земли. И с каждым годом их количество увеличивается. Основная цель работы – оценить геокриологическое состояние этих заброшенных пахотных земель. Исторически на Лено-Амгинском междуречье, в основном, пашни создаются путем вырубki и раскорчевки лиственничного леса на межлесных участках местности, которые отличаются высокой льдистостью литогенной основы. Основным мониторинговым полигоном Института мерзлотоведения для исследования стала пашня «Дыргыабай», которая является типичным для Тюнгюлюнской террасы р. Лены. Повышение температуры воздуха привело к росту глубины протаивания почвогрунтов на пашне и деградации ледового комплекса. За годы исследований верхняя кромка многолетнемерзлых грунтов опустилась от 1,8 м до 2,7 м. На сильно увлажненных участках глубина протаивания увеличилась до 3,5 – 4,5 м. На поверхности заброшенной пашни образовались многочисленные термокарстовые явления вплоть до былларов и озер различной стадии развития. Сделана оценка состояния заброшенных пахотных земель в пяти административных районах региона по трем категориям: 1) нарушенные термокарстом земли; 2) не нарушенные термокарстом; 3) не нарушенные термокарстом пахотные земли, но зарастающие кустарниками и древесостоем. В данное время в регионе поверхность 33 % заброшенных пахотных земель нарушена остаточно-полигональным рельефом и зачаточными термокарстовыми озерами, 57 % поверхности земель не нарушена, а 10 % зарастает древесной и кустарниковой растительностью. При дальнейшем потеплении климата в регионе доля нарушения поверхности криогенными процессами еще увеличится.

Ключевые слова: потепление климата, криогенные процессы, сезонно-талый слой, деятельный слой, многолетнемерзлые грунты, термокарст, повторно-жильный лед, среднегодовая температура воздуха, западинно-бугристый рельеф, ледовый комплекс

Финансирование. Работа выполнена за счет базового проекта Института мерзлотоведения СО РАН «Эволюция и устойчивость мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (рег. № 126020516688-9)

Для цитирования. Ефремов П.В. Геокриологическое состояние пахотных земель Лено-Амгинского междуречья при потеплении климата. *Вестник СВФУ*. 2026;(1):63-73. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-63-73

Original article

GEOCRYOLOGICAL STATE OF CROPLANDS IN THE LENA–AMGA INTERFLUVE IN A WARMING CLIMATE

Pyootr V. Efremov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation
pvefremov@mpi.ysn.ru

Abstract

This article examines the climate warming effects on thermokarst development on cropland surfaces in the Lena–Amga interfluve. An increasing number of cropland fields have to be abandoned due to enhanced

thermokarst. The main purpose of this study is to assess the condition of the abandoned lands. Historically, land for agriculture in the Lena–Amga interfluvium was cleared by clear-cutting larch forests in inter-alar terrain underlain by ice-rich permafrost. Monitoring observations by the Melnikov Permafrost Institute have been conducted mainly in the Dyrgyabai field which is representative of the Tyungyulyu terrace of the Lena River. Increasing air temperatures have resulted in deeper soil thawing and degradation of the Ice-Complex permafrost. During the monitoring period, the permafrost table has lowered from 1.8 m to 2.7 m. In wet areas, thawing has reached the depths of 3.5–4.5 m. The abandoned cropland surface is now dotted by numerous thermokarst features, including byllars and incipient to mature thaw lakes. An assessment of abandoned cropland condition is provided for five administrative districts in the region by three categories: 1) land disturbed by thermokarst; 2) land unaffected by thermokarst; 3) undisturbed land overgrown with shrubs and trees. Presently, 33 % of the abandoned croplands in the region is distorted by residual polygonal landforms and incipient thermokarst lakes, 57 % is undisturbed, and 10 % is overgrown with trees and shrubs. Further warming in the region will increase the percentage of disturbed land.

Keywords: climate warming, cryogenic processes, active layer, permafrost, thermokarst, ice wedge, mean annual air temperature, hummock-and-hollow topography, Ice Complex

Funding: This study was supported by the state-funded project of the Melnikov Permafrost Institute “Evolution and stability of permafrost landscapes in Eastern Siberia” (No. 126020516688-9)

For citation: Efremov P.V. Geocryological state of croplands in the Lena–Amga interfluvium in a warming climate. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(1):63-73. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-63-73

Введение

За последние 25–30 лет состояние большинства пахотных земель Лено-Амгинского междуречья, созданных в 50–60-х годах прошлого века, ухудшилось из-за развития на их поверхности различных термокарстовых процессов и явлений под влиянием потепления климата. При увеличении глубины протаивания сезонно-талого слоя (СТС) происходит деградация ледового комплекса с мощными повторно-жильными льдами (ПЖЛ). При оттаивании льдистых грунтов со временем на поверхности образуются остаточный полигональный рельеф (быллары) и в деятельном слое подземные пустоты. Местами на поверхности пашни появляются небольшие термокарстовые озера. В итоге многие пашни выводятся из севооборота и превращаются в бросовые земли. Цель работы: оценить геокриологическое состояние заброшенных пахотных земель региона.

Ранее криогенное строение рассматриваемой территории и развитие здесь термокарстовых процессов изучали Соловьев П.А. [1], Гаврильев П.П. [2, 3], Босиков Н.П. [4], Босиков Н.П. и др. [5], Гаврильев П.П. и др. [6], Угаров И.С., Мандаров А.А. [7], Федоров А.Н. [8], Варламов С.П. и др. [9], Abe et al. [10], Varlamov et al. [11] и многие другие.

В Мегино-Кангаласском районе из множества пахотных земель была выбрана пашня «Дыргыбай» для создания мониторингового полигона. Она являлась типичной для Тюнгюлюнской террасы р. Лены. Основной причиной для выбора пашни была близость от г. Якутска и наличие хорошей дороги в любое время года. Пашня была образована в 1956 г. на межаласье в 2-х км юго-западнее от с. Чюйя и имела площадь 159 га. Мониторинговый полигон был создан в 1992 г. под руководством д.г.н. Гаврильева П.П. при участии к.г.н. Угарова И.С., Аргунова Р.Н. и автора статьи. По мере исследования территории пашни были обнаружены многочисленные ПЖЛ, которые залегают на глубине 1,8 м. Пробурили скважину механическим буром глубиной 12 м. Не выявили нижнюю кромку ПЖЛ. Рядом с пашней находятся аласы Майя, Чюйя, Улуу-Сыһы, Мооро, глубина которых изменяется от 15 до 20 м. Следовательно, мощность ПЖЛ может также варьировать от 15 до 20 м. Выявили границы кровли льда, которая изменяется от 0,8 до 3,0 м. Объемная льдистость грунта пашни составила 0,6 доли единиц с учетом этих размеров ПЖЛ. При отборе проб грунта на влажность и при проходке шурфов встречались многочисленные рыхлые грунты и подземные пустоты на месте оттаявшего льда.

Со временем на поверхности пашни стали проявляться многочисленные термопросадки. В результате этого пашня была заброшена в 1996 г. И с тех пор она превратилась в залежь и стала использоваться как пастбище для скота. Иногда грунт полигона берут для ремонта автодороги. Сейчас поверхность полигона имеет, в основном, западинно-бугристый рельеф.

Материалы и методы исследования

Для удобства изучения на полигоне «Дыргыбай» были организованы 6 мониторинговых площадок. Площадка 1 была создана в лиственничном лесу с разнотравно-брусничным покровом на юго-восточной части пашни в 100 м от его края. Высота верхнего яруса составляет 15-17 м, среднего – 7-8 м. Диаметр стволов древостоя изменяется от 0,25 до 0,50 м. Сомкнутость крон – 0,5-0,7. Мощность лесной подстилки составляет 0,02 м. Ниже до 0,04 м – слой перепревших корней травы. Мощность гумусового слоя 0,15 м. Почвы площадки состоят из мерзлотных палевых среднеосолоделых суглинков. Остальные 5 площадок были выбраны на различных участках пашни. В 2002 г. вдобавок этим была создана площадка 7 в восточной части полигона в тонкоствольном лиственничном лесу с бруснично-зеленомошным покровом. В данное время мониторинговые исследования проводятся на 4 площадках: в двух лесных (площадки 1 и 7) и в двух на открытом участке, где прогрессируют термокарстовые явления (площадки 4 и 5).

На полигоне был создан комплекс гидротермических и мерзлотных исследований на мониторинговых площадках. Для проведения температурных наблюдений были установлены термисторные гирлянды на глубинах от 2 до 10 м. Погрешность измерения температуры не выходила за пределы $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Температура поверхностного слоя грунтов до 0,2 м определялась с помощью термометров Савинова. В 2002 г. на площадке 7 был установлен логгер TP-52 японского производства с датчиком на глубине 1,6 м, который нормально работает до настоящего времени. Глубина протаивания почвогрунтов измеряется при помощи железного щупа, трубчатых измерителей протаивания и во время проходки шурфов. Для определения влажности грунтов проводился отбор проб почвенным и механическим буром. Грунты высушивали в термостате при температуре 105°C . Объемный вес грунта определялся методом режущих колец, а удельный вес, гранулометрический состав, пластичность грунтов определялись в аналитической лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН. Все проводимые работы соответствовали методикам, принятым в мерзлотоведении, почвоведении, экологии и мелиорации [12, 13, 14].

Результаты и обсуждение

Как известно, температура воздуха является главным показателем климата, и чаще всего изменение климата характеризуют по изменению именно этого климатического параметра [15]. Другие элементы климата, такие как осадки и снежный покров, также важны. Но они имеют несколько подчиненное значение. В наших исследованиях средние годовые температуры воздуха определялись по методу А.В. Павлова [16]. В расчет брали данные с октября предыдущего года, когда температура грунта достигает устойчивого отрицательного значения, по сентябрь последующего года. При этом весь холодный период оказывается внутри одного расчетного (геокриологического) года.

За последние 80 лет данные температуры воздуха по метеостанции г. Якутска показали, что до середины 60-х годов прошлого столетия потепления не было. Начиная с 1966 г. стала незначительно повышаться. Потепление зимних температур повлияло на резкое повышение средней годовой температуры в 1988-1989 гг. (рис. 1). Это привело к развитию термокарстовых процессов и явлений на пашне «Дыргыбай» в начале 90-х годов прошлого столетия. Вклад летних месяцев (май-сентябрь) незначителен [15]. Температуру воздуха в Лено-Амгинском междуречье рассматривал по трем метеостанциям: г. Якутск, с. Амга и с. Ытык-Кюель. На метеостанции г. Якутска в период с 2019 по 2020 годы было зафиксировано максимальное значение среднегодовой температуры воздуха $-6,2^{\circ}\text{C}$. В период с 1961 по 1990 гг. средняя многолетняя температура воздуха считалась -10°C . По сравнению с этим периодом она повысилась на $3,8^{\circ}\text{C}$. На метеостанциях, расположенных в сёлах Амга и Ытык-Кюель, максимальные значения средне-

годовой температуры достигнуты в более поздний период – с 2024 по 2025 годы, и составили $-7,4^{\circ}\text{C}$ и $-8,4^{\circ}\text{C}$ соответственно, что значительно превышает данные метеостанции г. Якутска.

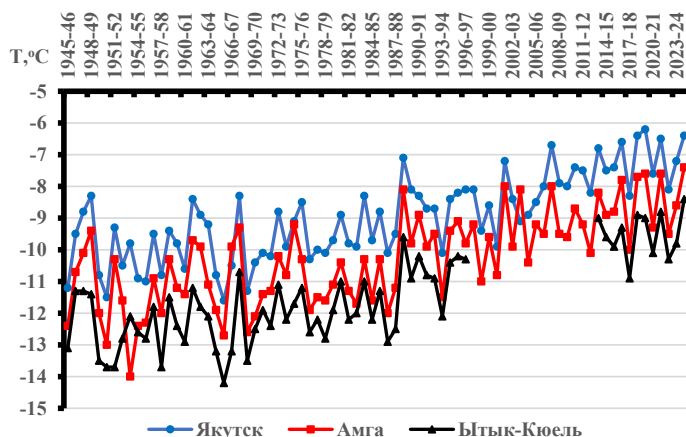
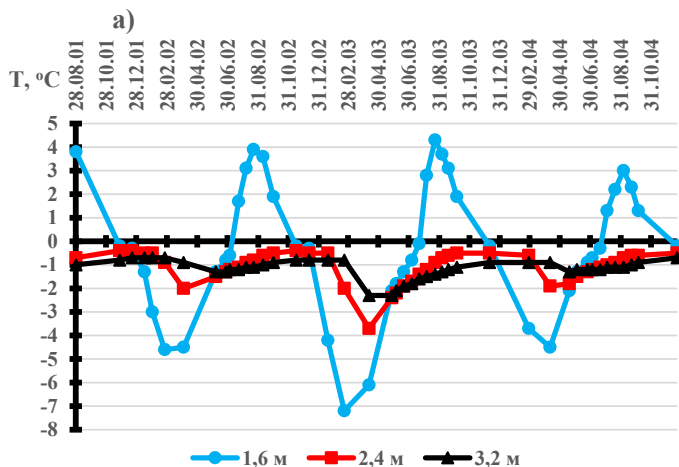


Рис. 1. Многолетняя изменчивость средней годовой температуры воздуха (гидрологического года) по данным метеостанций, 1945–2025 гг.

Fig. 1. Long-term variability in mean annual (hydrologic year) air temperature according at weather stations data, 1945-2025

В начале исследования на площадке 1 (в лиственничном лесу) температура грунта на глубине 7 м составила $-2,6^{\circ}\text{C}$, а на глубине 10 м $-2,8^{\circ}\text{C}$. А на самой пашне в 1993 г. на площадках 2, 3 и 5 температура по глубине была одинакова. Так, на глубине годовых теплооборотов (10 м) составила $-2,2^{\circ}\text{C}$, а на глубине 7 м $-1,8^{\circ}\text{C}$. Потепление климата привело к повышению температуры грунтов на безлесном участке полигона «Дыргыабай». За годы исследований на площадке 2 температура многолетнемерзлых пород (ММП) на глубине 10 м повысилась с $-2,2^{\circ}\text{C}$ в 1993 г. до $-0,9^{\circ}\text{C}$ в 2006 г. На площадке 5, где образовался зрелый быллар, на глубине 7 м температура грунта повысилась с $-0,8^{\circ}\text{C}$ в 2009 г. до $-0,5^{\circ}\text{C}$ в 2024 г. На площадке 4 на ровном участке в 2001-2004 гг. минимальная температура грунта на глубине 2,4 м повысилась от $-3,7^{\circ}\text{C}$ до $-1,9^{\circ}\text{C}$ (рис. 2а). А в 2021-2024 гг. температура грунта на той же глубине варьировала от $-0,4^{\circ}\text{C}$ до $+3,0^{\circ}\text{C}$ (рис. 2б). Максимальная температура была достигнута в 2023 г. Даже на глубине 3,2 м температура грунта с 2023 г. с отрицательной повысилась до положительного, максимально до $+0,6^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 2б).



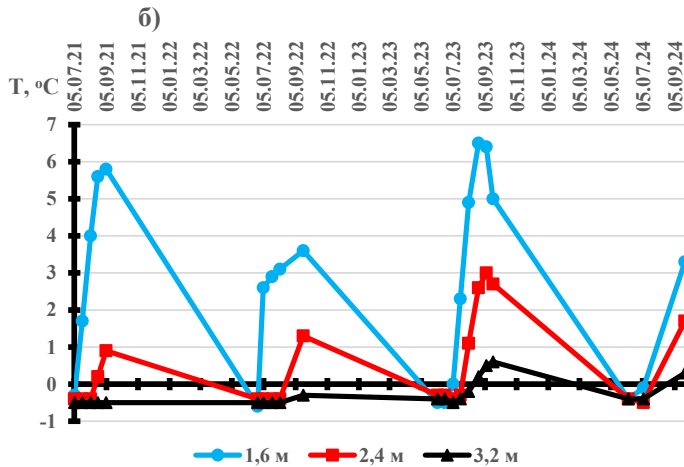


Рис. 2. Изменчивость температуры грунтов на площадке 4 по годам: а) 2001–2004 гг.; б) 2021–2024 гг.
 Fig. 2. Variability of soil temperature at plot 4 over the years: а) 2001–2004; б) 2021–2024

На лесных площадках на глубину протаивания грунтов влияют затеняющая роль деревьев, толщина лесной подстилки, наличие мха, высокая начальная влажность почвы. За исследуемый период на площадке 1 мощность СТС изменялась от 1,15 до 1,45 м (рис. 3). В одно время местное население провело частичную вырубку деревьев для строительства изгороди. И это повлияло на некоторое увеличение мощности СТС. Растительность на площадке 7 представлена, в основном, лиственничником тонкоствольным бруснично-зеленомошным. Высота верхнего яруса 14–16 м. Диаметр деревьев варьирует от 0,08 до 0,15 м. Имеются единичные лиственницы толщиной до 0,45–0,55 м. Сомкнутость крон – 0,7–0,8. Лесная подстилка на площадке 7 толще на 3–4 см, чем на площадке 1. Глубина протаивания за годы исследования изменялась от 0,92 до 1,22 м. В последние годы идет тенденция к увеличению, но за счет мощной лесной подстилки за все время измерений мощность СТС была меньше, чем на площадке 1.

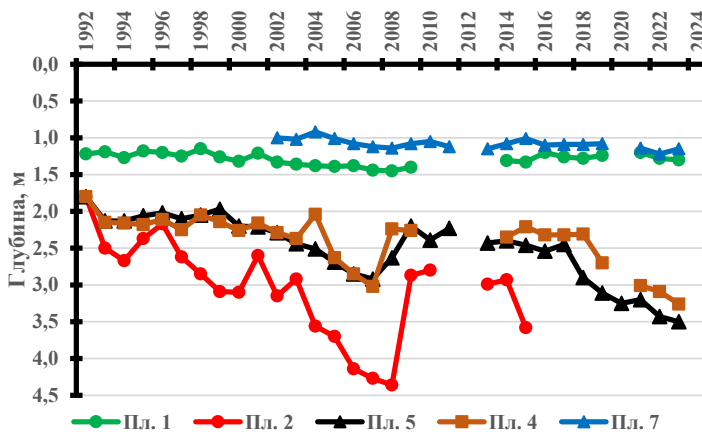


Рис. 3. Динамика СТС на различных площадках полигона «Дыргыабай» по годам
 Fig. 3. Variation in active layer thickness at several plots, Dyrgyabay monitoring site

На пашне в начале мониторингового исследования на всех площадках глубина протаивания грунтов была 1,80 м (см. рис. 3). С 1993 г. она стала постепенно возрастать, но неравномерно по

площадкам. На площадке 2 в конце 90-х годов первым на полигоне «Дыргыабай» образовался быллар, который со временем значительно увеличил свои размеры. За счет высокой влажности грунтов глубина протаивания в 2008 г. увеличилась до 4,36 м, т.е. возросла в 2,5 раза. На этом месте в настоящее время за счет накопления талых снеговых и дождевых вод, и поступающих вод от таяния мощных ПЖЛ образовалась дюёда – термокарстовое озеро. На площадке 5 криогенные процессы стали развиваться чуть позже. Быллар образовался в начале 2000-х годов. Уже с 2008 г. стала скапливаться вода до начала июня, но быстро испарялась. В настоящее время по мере углубления проседания вода держится уже до конца июля месяца (рис. 4). Соответственно влажность грунтов в СТС становится высокой, т.е. не ниже 30 % от объема. В 2023 г. грунты протаяли на глубину 3,5 м. Площадка 4 была создана на ровном участке пашни недалеко от термокарстовой просадки. Позже на месте той термопросадки образовался быллар с меньшими размерами по площади. Но глубина протаивания на площадке 4 постепенно возрастала и сейчас достигла 3,26 м. Значит быллар продолжает усиленно развиваться и увеличивать свою площадь в сторону ровного участка. Еще в начале 1990-х годов профессор Гаврильев П.П. писал, что грунты верхней части ледового комплекса полигона «Дыргыабай» на участках без лесного покрова перешли из устойчивого состояния в неустойчивое [3]. При этом исчез так называемый «защитный грунтовый слой», под которым понимается мерзлый слой грунта, расположенный ниже максимальной глубины протаивания до уровня верхних оголовок ПЖЛ. Защитный слой раньше предохранял от таяния верхнюю часть ПЖЛ, поэтому в то время не было просадок поверхности. Сейчас даже при относительно небольшом повышении средней годовой температуры воздуха увеличивается глубина протаивания грунтов и происходит таяние верхней кровли ММП с ПЖЛ.



Рис. 4. Быллар с талой и дождевой водой, площадка 5, июнь 2023 г.

Fig. 4. A byllar with melt- and rainwater, plot 5, June 2023

Осадки приведены по данным метеостанции г. Якутска за август и сентябрь, так как выпавшие в августе дожди не успевают испариться полностью, и оказывают большое влияние на влажность грунтов в сентябре месяце. Минимальные осадки выпали в 2020 г. и составили всего 15 мм (9 и 6 мм соответственно) (рис. 5). Максимальные осадки были в 2006 году (205 мм). В августе выпали 151 мм осадков, а в сентябре – 54 мм. Влагозапас метрового слоя грунтов на ровном участке площадки 4 изменялся от 144 (2018 г.) до 255 мм (2006 г.). А двухметрового

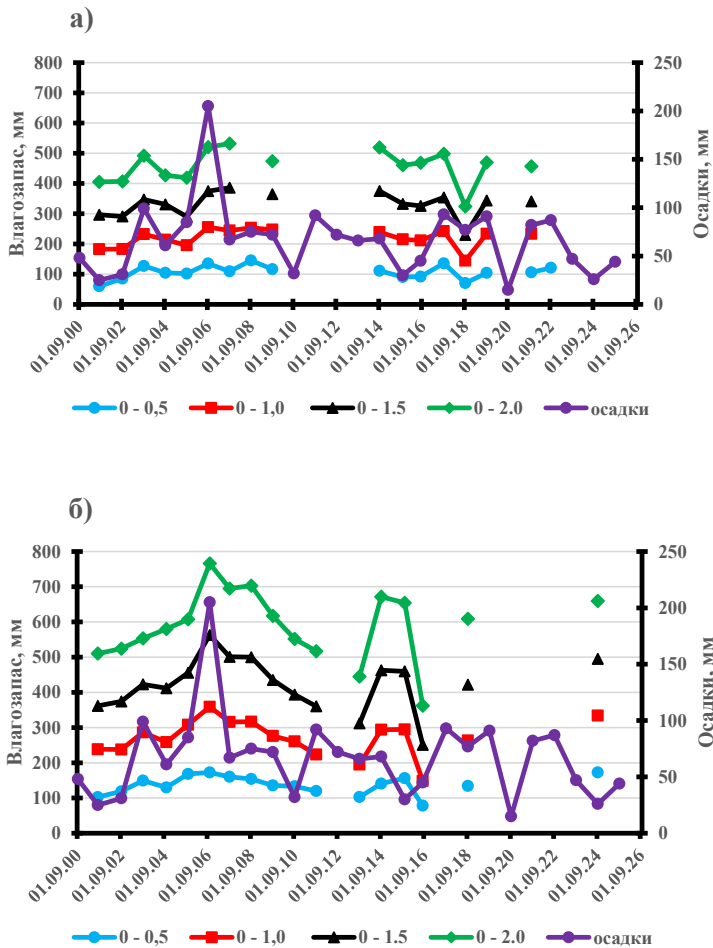


Рис. 5. Межгодовая изменчивость осеннего влагозапаса почвогрунтов на полигоне «Дыргыабай» по слоям: а) площадка 4; б) площадка 5

Fig. 5. Interannual variability of autumn soil moisture content at the Dyrgyabay test site by layers: a) site 4; b) site 5

слоя варьировал от 234 (2018 г.) до 532 мм (2007 г.). На площадке 5 влагозапас грунтов намного выше из-за западинно-бугристого микрорельефа, где накапливаются талые и дождевые воды, которые в последние годы испаряются только в конце июля месяца. В метровом слое грунтов запас влаги изменяется от 148 (2016 г.) до 359 мм (2006 г.), а в двухметровом слое – от 362 (2016 г.) до 766 мм (2006 г.). Максимальная разница 2-хметрового слоя между площадками была в 2006 г. и составила 246 мм.

В 2023 г. по данным съемок квадрокоптером DJI Phantom 4 полигона «Дыргыабай» была сделана оценка состояния его поверхности. По его результатам была составлена карта-схема геокриологического состояния поверхности данного полигона (рис. 6). Определили какие основные элементы рельефа сколько площадей занимают. Оказалось, что наибольшую площадь из них занимают полигонально-бугристые просадочные формы рельефа – быллары. Они занимают 66 % от всей территории полигона. Наименьшую площадь имеют участки, где образовались термокарстовые озера в различной стадии развития: иё, дюёдя, тымпы. Всего они составили 3 % от всей территории полигона.

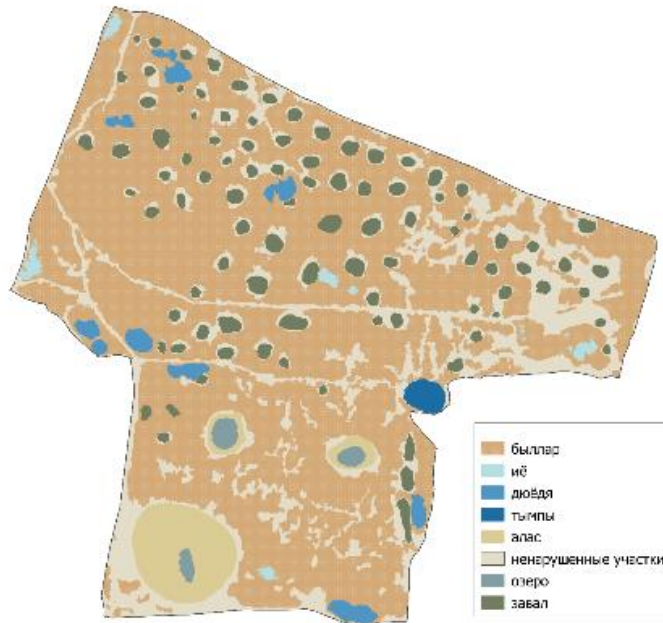


Рис. 6. Карта-схема геокриологического состояния полигона «Дыргыабай»
Fig. 6. Schematic map of the geocryological state, Dyrgyabay site

Территория Лено-Амгинского междуречья разделена на 5 административных районов: Мегино-Кангаласский, Усть-Алданский, Амгинский, Чурапчинский и Таттинский. И по каждому району была сделана оценка территории пахотных земель по трем категориям: 1) нарушенные термокарстом земли, где образовались многочисленные быллары и термокарстовые озера; 2) не нарушенные термокарстовыми процессами; 3) не нарушенные термокарстом земли, но зарастающие древесной и кустарниковой растительностью (таблица).

Таблица

Состояние пахотных земель по административным районам (%)

Table

Condition of arable lands by administrative districts (%)

Районы	Нарушенные термокарстом	Не нарушенные термокарстом	Заросшие древесной растительностью
Таттинский	61,5	32,3	6,2
Чурапчинский	42,5	48,1	9,4
Амгинский	33,6	59,9	6,5
Мегино-Кангаласский	15,5	67,3	17,2
Усть-Алданский	7,4	74,2	18,4
Итого	32,8	57,0	10,2

По итогам оценки выявились районы, где площади заброшенных пахотных земель наименее подвержены криогенным процессам. Это Мегино-Кангаласский и Усть-Алданский районы, у которых доля по первой категории (нарушенные термокарстом земли) составляет 15,5 % и 7,4 % соответственно. Также выявились в регионе районы, у которых территория пахотных земель наиболее подвержена термокарстовым процессам. Опережает всех Таттинский район – 61,5 %. Чуть отстает Чурапчинский район, где криогенным процессам подвержена 42,5 % пло-

щадя заброшенных сельскохозяйственных земель. А в Амгинском районе чуть больше трети заброшенных пахотных земель подвержена к различным термокарстовым процессам. В данное время в регионе поверхность 33 % заброшенных пахотных земель нарушена многочисленными термокарстовыми процессами, 57 % поверхности земель относительно нормальная, а 10 % за-растает древесной и кустарниковой растительностью. При дальнейшем потеплении климата в таком темпе некоторая часть заброшенных земель с ровной поверхностью может превратиться в нарушенные из-за активизации термокарста.

Заключение

Исследование в мониторинговом полигоне «Дыргыабай» показывает, что при продолжении потепления климата региона доля нарушенных пахотных земель термокарстом будет расти. В ближайшем будущем при проектировании пахотных земель необходимо исключить создание новых пашен в межлассном типе местности, где грунты отличаются большой льдистостью. Была проведена площадная оценка состояния заброшенных пахотных земель на Лено-Амгинском междуречье по административным районам. В условиях современного потепления климата актуальной является задача оценки всех сельскохозяйственных земель Центральной Якутии на предмет возможной деградации от активизации криогенных процессов.

Литература

1. Соловьев П.А. *Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья*. М.: Изд-во АН СССР; 1959:144.
2. Гаврильев П.П. Термопросадки и деформация поверхности поля при мелиорации долины р. Амги. *Криогидрогеологические исследования*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР; 1985:148-161.
3. Гаврильев П.П. О развитии криогенных процессов и устойчивости агроземель в Якутии. *Закономерности развития и дифференциации мерзлотных ландшафтов*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН; 1993:98-110.
4. Босиков Н.П. Влияние антропогенных факторов на интенсивность криогенных процессов. *Использование и охрана сельскохозяйственных ресурсов Якутии*. Якутск; 1988:11-17.
5. Босиков Н.П., Васильев И.С., Федоров А.Н. *Мерзлотные ландшафты зоны освоения Лено-Алданского междуречья*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР; 1985:124.
6. Гаврильев П.П., Угаров И.С., Ефремов П.В. *Мерзлотно-экологические особенности таежных агроландшафтов Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН; 2001:196.
7. Угаров И.С., Мандаров А.А. *Орошение дождеванием кормовых культур в Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН; 2000:127.
8. Федоров А.Н. Роль вырубок в развитии мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. *Региональные и инженерные геокриологические исследования*. Якутск; 1985:111-117.
9. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Современная изменчивость термического режима грунтов тунгюлюнской террасы долины р. Лены. *Вопросы географии Якутии*. Вып. 11: Влияние изменений климата на природные процессы криолитозоны. Якутск: Изд-во «СМИК-МАСТЕР»; 2013:38-43.
10. Abe, T., Iwahana, G., Efremov, P.V., Desyatkin, A.R., Kawamura, T., Fedorov, A., Zhegusov, Y., Yanagiya, K., Tadono, T. Surface displacement revealed by L-band InSAR analysis in the Mayya area, Central Yakutia, underlain by continuous permafrost. *Earth, Planets and Space*. 2020;72(1):138. DOI: 10.1186/s40623-020-01266-3
11. Varlamov, S.P., Skachkov, Y.B., Skryabin, P.N. Influence of Climate Change on the Thermal Condition of Yakutia's Permafrost Landscapes (Chabyda Station). *Land*. 2020;9(5):132. DOI: 10.3390/land9050132
12. Павлов А.В. *Теплофизика ландшафтов*. Новосибирск: Наука; 1979:285.
13. Гаврильев П.П., Мандаров А.А. *Лиманное орошение лугов в Центральной Якутии*. Новосибирск: Наука; 1976:165.
14. *Полевые геокриологические (мерзлотные) исследования (методическое руководство)*. М.: Изд-во АН СССР; 1961:424.
15. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. *Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН; 2021:156.
16. Павлов А.В. *Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой*. М.: Изд-во АН СССР; 1965:254.

References

1. Soloviev P.A. *Cryolithozone of the northern part of the Lena-Amga interfluvium*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1959:144 (in Russian).
2. Gavriliev P.P. Thermal subsidence and deformation of the field surface during melioration of the Amga River valley. *Cryohydrogeological Studies*. Yakutsk: Permafrost Institute SB USSR Academy of Sciences; 1985:148–161 (in Russian).
3. Gavriliev P.P. On the development of cryogenic processes and the stability of agricultural lands in Yakutia. *Patterns of development and differentiation of permafrost landscapes*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 1993:98–110 (in Russian).
4. Bosikov N.P. Influence of anthropogenic factors on the intensity of cryogenic processes. *Use and protection of agricultural resources of Yakutia*. Yakutsk; 1988:11–17 (in Russian).
5. Bosikov N.P., Vasiliev I.S., Fedorov A.N. *Permafrost landscapes in the development zone of the Lena–Aldan Watershed*. Yakutsk: Permafrost Institute, SB USSR Academy of Sciences; 1985:124 (in Russian).
6. Gavriliev P.P., Ugarov I.S., Efremov P.V. *Permafrost-ecological characteristics of taiga agricultural landscapes, Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 2001:196 (in Russian).
7. Ugarov I.S., Mandarov A.A. *Overhead irrigation of fodder crops in Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 2000:127 (in Russian).
8. Fedorov A.N. The role of clearings in the development of permafrost landscapes in Central Yakutia. *Regional and Engineering Geocryological Studies*. Yakutsk; 1985:111–117 (in Russian).
9. Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Current variation in the the ground thermal regime in the Tyungyulyu terrace, Lena River valley. *Voprosy Geografii Yakutii*. Vol. 11: Effects of Climate Change on Natural Processes in the Permafrost Zone. Yakutsk: SMIK-MASTER Publ. 2013:38–43 (in Russian).
10. Abe T., Iwahana G., Efremov P.V., et al. Surface displacement revealed by L-band InSAR analysis in the Mayya area, Central Yakutia, underlain by continuous permafrost. *Earth, Planets and Space*. 2020;72(1):138. DOI: 10.1186/s40623-020-01266-3
11. Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Influence of Climate Change on the Thermal Condition of Yakutia's Permafrost Landscapes (Chabyda Station). *Land*. 2020;9(5):132. DOI: 10.3390/land9050132
12. Pavlov A.V. *Thermal physics of landscapes*. Novosibirsk: Nauka; 1979:285 (in Russian).
13. Gavriliev P.P., Mandarov A.A. *Basin irrigation of meadows in Central Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1976:165 (in Russian).
14. *Field geocryological (permafrost) studies (methodological guidelines)*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1961:424 (in Russian).
15. Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. *Monitoring of the ground thermal regime in Central Yakutia*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2021:156 (in Russian).
16. Pavlov A.V. *Heat exchange between the freezing and thawing soils and the atmosphere*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1965:254 (in Russian).

Сведения об авторе

ЕФРЕМОВ Петр Васильевич – н.с. Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, г. Якутск, Российская федерация, ORCID: 0000-0003-0079-8481, Researcher ID: ADD-6701-2019, Scopus Author ID: 57189894858, SPIN: 8918-7160

E-mail: pvefremov@mpi.ysn.ru

Author Information

Petr V. EFREMOV – Researcher, Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0079-8481, Researcher ID : ADD-6701-2019, Scopus Author ID : 57189894858, SPIN : 8918-7160

E-mail: pvefremov@mpi.ysn.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 13.01.2026

Поступила после рецензирования / Revised 19.03.2026

Принята к публикации / Accepted 27.03.2026