



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ISSN 1560-7496

КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ



5

СЕНТЯБРЬ–ОКТЯБРЬ

ТОМ XXIX, 2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

член-корреспондент РАН, д-р геол.-мин. наук *М.Н. Железняк*

Заместители главного редактора:

академик РАН, д-р геогр. наук *В.М. Котляков*

д-р геол.-мин. наук *Д.С. Дроздов*

Научный консультант академик РАН *В.П. Мельников*

Ответственный секретарь д-р геол.-мин. наук *В.Е. Тумской*

Члены редколлегии:

д-р геогр. наук *В.Р. Алексеев*, д-р геол.-мин. наук *А.В. Брушков*, д-р геол.-мин. наук *А.Ю. Бычков*, д-р геол.-мин. наук *А.А. Васильев*, д-р геогр. наук *С.Р. Веркулич*, д-р геогр. наук *А.С. Викторов*, д-р физ.-мат. наук *М.Л. Владов*, д-р геогр. наук *А.Ф. Глазовский*, д-р геол.-мин. наук *Я.Б. Горелик*, д-р геогр. наук *М.Н. Григорьев*, д-р геол.-мин. наук *А.Д. Дучков*, д-р хим. наук *В.А. Истомин*, канд. геол.-мин. наук *М.З. Каневский* (США), академик РАН *Н.С. Касимов*, канд. геогр. наук *А.И. Кизяков*, д-р геол.-мин. наук *И.А. Комаров*, д-р техн. наук *И.Н. Модин*, д-р хим. наук *А.Н. Нестеров*, д-р геогр. наук *С.А. Огородов*, канд. геол.-мин. наук *В.В. Оленченко*, канд. геогр. наук *Д.А. Петраков*, д-р геол.-мин. наук *Ф.М. Ривкин*, канд. геол.-мин. наук *Е.М. Ривкина*, д-р геогр. наук *В.В. Rogov*, проф. *В.Е. Романовский* (США), канд. геол.-мин. наук *М.Р. Садуртдинов*, д-р геол.-мин. наук *Е.А. Слагода*, д-р биол. наук *А.В. Соромотин*, д-р геол.-мин. наук *В.Т. Трофимов*, д-р геогр. наук *А.Н. Фёдоров*, д-р техн. наук *Л.Н. Хрусталеv*, проф. *Х.-В. Хуббертен* (ФРГ), д-р геол.-мин. наук *В.Г. Чеверев*, д-р геол.-мин. наук *Г.А. Черкашев*, канд. геол.-мин. наук *Чжан Цзэ* (КНР), канд. геол.-мин. наук *Е.М. Чувилин*, д-р геол.-мин. наук *В.В. Шепелёв*, проф. *Н.И. Шикломанов* (США), проф. *Ю.Л. Шур* (США)

Адрес редакции: 117312, Москва, ул. Вавилова, 37, комн. 22

Институт географии РАН

Редакция журнала "Криосфера Земли"

Редакционная группа: *Н.В. Арутюнян*, к.г.н. *Н.Г. Белова*, к.г.-м.н. *О.М. Лисицына*, к.г.-м.н. *Г.Е. Облогов*

Редактор английского перевода к.г.н. *Д.Е. Конюшков*

Тел. +7(985) 957-10-01, e-mail: kriozem@gmail.com

Учредители журнала:

Сибирское отделение Российской академии наук

ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

Журнал основан и издается при участии Института криосферы Земли – обособленного структурного подразделения ФИЦ ТюмНЦ СО РАН

Настоящий номер издан при финансовой поддержке компании "Норникель" и ООО "НПО "Север"

Подготовлено к печати Сибирским отделением РАН

Зав. редакцией *М.А. Трашкева*

Художественный редактор *Н.Ф. Суранова*

Компьютерная верстка *Н.М. Райзвих*

Фотография на обложке *В.Е. Тумского*.

Ледяная жила и псевдоморфоза по ледяной жиле.

Голоценовые аласные отложения, низовья р. Индигирки. 29 июля 2025 г.

Подписано в печать 20.10.25. Дата выхода в свет 31.10.25. Формат 60×84¹/8.

Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 6,4. Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 223.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 31.03.2023. ПИ № ФС 77-85088.

Адрес издателя: 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, тел.: (3452) 68-87-71

Отпечатано в Сибирском отделении РАН. 630090, Новосибирск, Морской пр. 2

Тел.: (383) 330-84-66, e-mail: e.lyannaya@sb-ras.ru, <https://www.sibran.ru>

EDITORIAL BOARD

Chief Editor

M.N. Zheleznyak, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences

Associate chief editors:

V.M. Kotlyakov, Full Member of Russian Academy of Sciences

D.S. Drozdov, Doctor of Sciences

Scientific consultant

V.P. Melnikov, Full Member of Russian Academy of Sciences

Executive secretary

V.E. Tumskoy, Doctor of Sciences

Editorial board:

V.R. Alekseev, professor; *A.V. Brouchkov*, Doctor of Sciences; *A.Yu. Bychkov*, professor of RAS; *A.A. Vasiliev*, Doctor of Sciences; *S.R. Verkulich*, Doctor of Sciences; *A.S. Viktorov*, Doctor of Sciences; *M.L. Vladov*, professor; *A.F. Glazovsky*, Dr.; *J.B. Gorelik*, Doctor of Sciences; *M.N. Grigoriev*, Doctor of Sciences; *A.D. Duchkov*, professor; *V.A. Istomin*, professor; *M.Z. Kanevskiy*, professor (USA); *N.S. Kasimov*, Full Member of RAS; *A.I. Kizyakov*, Dr.; *I.A. Komarov*, professor; *I.N. Modin*, professor; *A.N. Nesterov*, Doctor of Sciences; *S.A. Ogorodov*, professor of RAS; *V.V. Olenchenko*, Dr.; *D.A. Petrakov*, Dr.; *F.M. Rivkin*, Doctor of Sciences; *E.M. Rivkina*, Dr.; *V.V. Rogov*, professor; *V.E. Romanovsky*, professor (USA); *M.R. Sadurtdinov*, Dr.; *E.A. Slagoda*, Doctor of Sciences; *A.V. Soromotin*, Doctor of Sciences; *V.T. Trofimov*, professor; *A.N. Fedorov*, Doctor of Sciences; *L.N. Khrustalev*, professor; *H. Hubberten*, professor (Germany); *V.G. Cheverev*, Doctor of Sciences; *G.A. Cherkashev*, professor; *Ze Zhang* (China); *E.M. Chuvilin*, Dr.; *V.V. Shepelev*, professor; *N.I. Shiklomanov*, professor (USA); *Yu.L. Shur*, professor (USA)

Editorial Office of *Earth's Cryosphere*

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences

Vavilova St. 37, office 22, Moscow, 117312 Russia

Editorial staff: *N.V. Arutyunyan*, *N.G. Belova*, *O.M. Lisitsyna*, *G.E. Oblogov*

Editor of the English translation *D.E. Konyushkov*

Phone: +7(985) 957-10-01, e-mail: kriozem@gmail.com

Journal promoted by:

Russian Academy of Sciences, Siberian Branch

Tyumen Scientific Centre SB RAS

Melnikov Permafrost Institute SB RAS

The journal was founded and published with the participation of the Institute of the Earth's Cryosphere – a separate structural unit of the Tyumen Scientific Centre SB RAS

This issue was published with the financial support of Norilsk Nickel company and LLC NPO “Sever”

Edited and prepared for press by the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Editorial Manager *M.A. Trashkeeva*

Designed by *N.F. Suranova*

Typeset by *N.M. Raizvikh*

Cover photo by *V.E. Tumskoy*.

Ice wedge and ice-wedge pseudomorph.

Holocene alas deposits, lower Indigirka River. July 29, 2025.

Publisher address: Tyumen Scientific Centre SB RAS, Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia
phone: (3452) 68-87-71

Printed by the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.
Morskoi Pr. 2, Novosibirsk, 630090 Russia
Phone: (383) 330-84-66, e-mail: e.lyannaya@sb-ras.ru, <https://www.sibran.ru>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1997	Периодичность 6 вып. в год	Том XXIX, № 5	Сентябрь–октябрь 2025
--------------------------	-------------------------------	---------------	--------------------------

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

- Маслаков А.А., Стрелецкий Д.А., Замолодчиков Д.Г.** Многолетний мониторинг осадки почв и верхней толщи многолетнемерзлых пород на площадке научного полигона “Приморские равнины Восточной Чукотки” 3

СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ЛЬДА

- Колунин В.С., Ишкова З.А.** Экспериментальные исследования влияния условий замораживания на фильтрационные свойства тонкодисперсного грунта 20

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

- Михайлов В.М.** Тектоногенные гидрогеологические феномены в талике низкопорядкового водотока 27

ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

- Данилов О.Ф., Краев А.Н., Шанхоев З.Ш., Синицкий А.И.** Конструктивно-технологическое решение, направленное на изменение температурного режима грунтов основания автомобильной дороги 38

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

- Оленченко В.В., Заплавнова А.А., Медведева М.В.** Строение источника гидрогеогенной наледи в Чуйской впадине (Горный Алтай) по геофизическим данным 45

ХРОНИКА

- Железняк М.Н., Шепелев В.В., Алексеева О.И., Сыромятников И.И.** Игорь Владимирович Климовский (19.08.1934 – 08.08.2025) 58

© Сибирское отделение РАН, 2025
© ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, 2025
© Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2025

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
SIBERIAN BRANCH

EARTH'S CRYOSPHERE
SCIENTIFIC JOURNAL

Founded in January 1997	6 issuers per year	Vol. XXIX, No. 5	September–October 2025
----------------------------	-----------------------	------------------	---------------------------

CONTENTS

GEOCRYOLOGICAL MONITORING AND FORECAST

- Maslakov A.A., Streletskiy D.A., Zamolodchikov D.G.** Long-term monitoring of soil and upper permafrost thaw subsidence at the Eastern Chukotka Coastal Plain research station. 3

PROPERTIES OF FROZEN GROUND AND ICE

- Kolunin V.S., Ishkova Z.A.** Experimental studies of the effect of freezing temperature regime on filtration properties of finely dispersed model soil. 20

SURFACE AND GROUND WATERS IN TERRESTRIAL PERMAFROST REGION

- Mikhailov V.M.** Tectonogenic hydrogeologic phenomena in the talik of a low-order watercourse. 27

PERMAFROST ENGINEERING

- Danilov O.F., Kraev A.N., Shankhoyev Z.Sh., Sinitskiy A.I.** A design and technological solution aimed at changing the temperature regime of the road base soils. 38

METHODS OF CRYOSPHERIC RESEARCH

- Olenchenko V.V., Zaplavnova A.A., Medvedeva M.V.** Geophysical model of the hydrogeogenic icing source in the Chuya basin (Gorny Altai). 45

CHRONICLE

- Zheleznyak M.N., Shepelev V.V., Alekseeva O.I., Syromyatnikov I.I.** Igor Vladimirovich Klimovsky (19.08.1934 – 08.08.2025). 58

© Siberian Branch of the RAS, 2025
© Tyumen Scientific Centre SB RAS, 2025
© Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 2025

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.345

DOI: 10.15372/KZ20250501

EDN: XZGVWZ

**МНОГОЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ ОСАДКИ ПОЧВ И ВЕРХНЕЙ ТОЛЩИ
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ПЛОЩАДКЕ НАУЧНОГО ПОЛИГОНА
“ПРИМОРСКИЕ РАВНИНЫ ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ”****А.А. Маслаков^{1,*}, Д.А. Стрелецкий², Д.Г. Замолодчиков³**¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т, кафедра криолитологии и гляциологии, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия*² *Университет Джорджа Вашингтона, 20052, Вашингтон, Округ Колумбия, США*³ *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А.С. Исаева РАН, лаборатория структурно-функциональной организации и устойчивости лесных экосистем, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, Россия***Автор для контакта; e-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru*

Климатические изменения в криолитозоне приводят к ряду характерных изменений природной среды, в частности, к росту температуры мерзлых пород, увеличению глубины сезонного оттаивания почвы и к активизации экзогенных криогенных процессов. В статье представлены результаты многолетнего мониторинга мощности сезонноталого слоя и вертикальных движений поверхности на площадке Циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) “Лаврентия”, расположенной на полигоне “Приморские равнины Восточной Чукотки”. Выявлено, что в результате возросшей летней теплообеспеченности за период 2004–2024 гг. скорость опускания дневной поверхности варьировала от 1.4 до 3.5 см/год, при этом скорость изменения мощности сезонноталого слоя составляла от –3.2 до +1.6 см/год. Осадка пород происходила за счет равномерного оттаивания сильнольдистого переходного слоя мерзлоты, без образования термокарстовых форм рельефа. Исследования показали, что на фоне относительно стабильных вариаций мощности сезонноталого слоя наблюдается постепенное однонаправленное опускание дневной поверхности, вызванное прогрессирующим оттаиванием переходного и промежуточного слоев почвенно-мерзлотного комплекса. Это свидетельствует о заметной недооценке темпов понижения кровли мерзлоты, полученных традиционным механическим способом.

Ключевые слова: сезонноталый слой, многолетнемерзлые породы, переходный слой, осадка при оттаивании, почвенно-мерзлотный комплекс.

Ссылка для цитирования: Маслаков А.А., Стрелецкий Д.А., Замолодчиков Д.Г. Многолетний мониторинг осадки почв и верхней толщи многолетнемерзлых пород на площадке научного полигона “Приморские равнины Восточной Чукотки” // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 5, с. 3–19. DOI: 10.15372/KZ20250501. EDN: XZGVWZ.

**LONG-TERM MONITORING OF SOIL AND UPPER PERMAFROST THAW SUBSIDENCE
AT THE EASTERN CHUKOTKA COASTAL PLAIN RESEARCH STATION****A.A. Maslakov^{1,*}, D.A. Streletskiy², D.G. Zamolodchikov³**¹ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Cryolithology and Glaciology Department, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*² *The George Washington University, Columbian College of Arts and Sciences, 20052, Washington DC, 2036 H St NW, USA*³ *Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity, Russian Academy of Sciences, Laboratory of structural and functional organization and resilience of forest ecosystems, Profsoyuznaya St. 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia***Corresponding author; e-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru*

Climate changes in permafrost regions lead to noticeable alteration of the environmental conditions, including, in particular, an increase in permafrost temperature and depth of seasonal thaw and an activation of exogenous cryogenic processes. This paper presents the results of monitoring the active layer thickness and vertical surface displacements at the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) site Lavrentiya located in the area of the “Eastern Chukotka Coastal Plains” research station. Under conditions of the increased summer heat supply over the period of 2004–2024, the rate of ground surface subsidence varied from 1.4 to 3.5 cm/yr, while changes in the active layer thickness (ALT) were from –3.2 to +1.6 cm/yr. The ground surface subsidence

took place due to the isotropic thawing of the ice-rich transient layer of the soil-permafrost complex without the formation of thermokarst landforms. Thus, against the background of relatively stable variations in the ALT, a gradual unidirectional subsidence of the surface caused by the progressive thawing of the transient and intermediate layers was observed. The results highlight a significant underestimation of the rates of permafrost table deepening obtained by the traditional mechanical probing method.

Keywords: active layer, permafrost, transient layer, thaw subsidence, soil-permafrost complex.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе летнего оттаивания почв и пород сезонноталого слоя (СТС) наблюдается процесс осадки пород, проявляющийся в виде опускания дневной поверхности. Этот процесс вызван фазовым переходом из льда в воду с уменьшением его объема. Во время осенне-зимнего промерзания СТС наблюдается обратный процесс поднятия дневной поверхности в результате пучения промерзающих отложений. Совокупность процессов сезонной осадки и пучения называется *криогенной пульсацией* [Романовский, 1993]. На участках близкого залегания к подошве СТС залежеобразующих льдов или высокольдистых отложений при увеличении глубины сезонного оттаивания может развиваться термокарст. В этом случае просадки поверхности будут иметь необратимый характер и приводить к образованию специфических форм микро- и мезорельефа [Шур, 1988] и соответствующих отложений [Романовский, 1977]. Оттаивание многолетнемерзлых пород, которое не ведет к формированию каких-либо форм рельефа, в зарубежной литературе называется изотропной осадкой при оттаивании (isotropic thaw subsidence) [Shiklomanov et al., 2013]. Таким образом, принято разделять сезонные деформации дневной поверхности, вызванные процессами пучения и осадки в сезонноталом слое, и многолетние деформации, вызванные оттаиванием пород, подстилающих СТС. В первом случае явление носит обратимый и циклический характер, во втором – вертикальные деформации земной поверхности развиваются односторонне, могут занимать годы и десятилетия, при этом их скорость имеет нелинейный характер [Баранов, Баулин, 1964].

Сезонные деформации поверхности могут иметь обратимый характер при условиях стационарного или квазистационарного климата, при котором летняя осадка оттаявших пород полностью компенсируется осенне-зимним пучением. В случаях экстремально теплых летних сезонов глубина сезонного оттаивания может затрагивать породы переходного слоя многолетней мерзлоты [Шур, 1988; Shur et al., 2005], входящего в состав почвенно-мерзлотного комплекса [Lupachev, Gubin, 2023], и приводить к повышенным значениям летней осадки почвы. Однако это явление нивелируется последующим похолоданием климата или перестройкой ландшафтов, во время которой переходный слой восстанавливается за счет консервации ранее оттаявшей части сезонноталого слоя,

или квазисинкриогенеза [Каневский, 2004]. По некоторым оценкам [Конищев, 2009], в результате естественной реакции ландшафтов на рост приземной температуры воздуха возникают обратные отрицательные связи, способствующие при определенном сочетании условий уменьшению СТС и нарастанию переходного слоя, обретающего защитную функцию. Например, если для автономных ландшафтов потепление климата ведет к росту мощности СТС и повышению температуры пород, то для подчиненных природных комплексов субаквального или супераквального типа (поймы, низкие террасы рек, мелкие речные долины, низины между грядами) наблюдается обратная ситуация, вызванная накоплением торфа и изменением теплофизических условий теплообмена в приповерхностном слое почвы [Конищев, 2003].

В результате наблюдаемого потепления климата Арктики, усилившегося с 1970-х годов [Rantanen et al., 2022], создаются условия, при которых за счет повышенного летнего теплопотока в почву происходит не только рост температуры мерзлых пород [Biskaborn et al., 2019], но и постепенное протаивание высокольдистых отложений переходного и промежуточного слоев. Осенне-зимнее пучение в этом случае не успевает компенсировать величину летней осадки пород и наблюдается постепенное, но необратимое понижение дневной поверхности. Мощность сезонноталого слоя при этом может не меняться вследствие его уплотнения по мере оттаивания высокольдистых отложений [Nyland et al., 2021]. Вследствие этого многолетние мониторинговые наблюдения за мощностью СТС, проводимые в пределах стационарных площадок при помощи мерзлотного щупа, зачастую приводят к серьезной недооценке скоростей опускания кровли ММП в различных регионах криолитозоны мира [Мажитова, Каверин, 2007; Shiklomanov et al., 2013].

Равномерное опускание дневной поверхности, вызванное современным ростом температуры приземного воздуха, имеет глобальный характер [Streletskiy et al., 2025]. Однако имеющиеся сведения о его географии и характеристиках разрознены; межгодовые тренды вертикальных движений поверхности были определены разными методами и имеют различные по протяженности временные ряды наблюдений. Развитие технологий дистанционного зондирования Земли – повышение доступности радарных снимков, улучшение методов

их обработки и анализа – серьезно расширили возможности для изучения как внутрисезонных, так и межгодовых вертикальных движений земной поверхности [Zhang et al., 2022; Zwieback et al., 2024]. При этом дороговизна космоснимков, трудоемкость обработки и пространственная ограниченность их использования являются главными лимитирующими факторами в такого рода исследованиях. Таким образом, с каждым годом появляется все больше исследований об изотропной осадке при оттаивании ММП, что позволяет сформировать более целостную картину проявления этого процесса, выявить природные факторы, определяющие его скорость, и региональные особенности.

Многолетние полевые наблюдения (более 10 лет) за вертикальными движениями дневной поверхности имеют крайне ограниченный охват территорий: север и запад Аляски [Shiklomanov et al., 2013; Nyland et al., 2021], Канадский арктический архипелаг [Zhang et al., 2020], Северо-Западные территории Канады [O'Neill et al., 2023], север европейской территории России [Kaverin et al., 2021] и Средняя Сибирь [Grebenets et al., 2021]. Результаты таких исследований имеют большую научную ценность, поскольку позволяют проследить долгосрочную динамику процессов сезонной осадки и пучения пород на фоне климатических вариаций, а также оценить скорости опускания поверхности в различных мерзлотно-ландшафтных условиях, преимущественно в тундровой и лесотундровой зонах. Кроме того, полученные сведения позволяют оценить скорости понижения кровли ММП на фоне стабилизации межгодовых вариаций мощности сезонноталого слоя, измеряемой мерзлотным щупом (см., например, [Oblogov et al., 2023]).

Наряду с другими регионами криолитозоны Северного полушария, например, севером европейской территории России и Западной Сибирью [Vasiliev et al., 2020], на Чукотском полуострове также зафиксированы признаки понижения кровли многолетней мерзлоты, что подтверждается результатами мониторинга параметров СТС [Maslakov et al., 2019]. Собранные ранее сведения на площадке CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) “Лаврентия” показали [Маслаков, Комова, 2019], что процесс оттаивания верхних горизонтов многолетней мерзлоты сопровождается постепенным опусканием дневной поверхности, по скорости сопоставимым с темпами роста глубины сезонного оттаивания почвы. Однако из-за ограниченности временных рядов наблюдений за осадкой выявить ведущие факторы, определяющие пространственные и временные вариации вертикальных движений дневной поверхности, в пределах площадки не удалось.

Настоящая статья представляет собой анализ результатов многолетних полевых наблюдений (2003–2024 гг.) за максимальной глубиной сезонного оттаивания почвы и вертикальными движениями дневной поверхности в результате осадки и пучения пород на площадке CALM “Лаврентия”, расположенной в пределах стационара “Приморские равнины Восточной Чукотки” (Чукотский АО). Целью данной работы является оценка текущих скоростей опускания кровли мерзлых пород в районе исследований и выявление природных факторов, влияющих на амплитуду вертикальных движений поверхности и межгодовую скорость осадки при оттаивании ММП в пределах площадки.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Площадка “Лаврентия” (индекс R-27) была заложена Д.Г. Замолотчиковым в рамках программы CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring program) в 2000 г. Она занимает площадь 1 га и расположена на пологом склоне в пределах водно-ледниковой равнины, в 800 м от южного побережья залива Лаврентия (рис. 1). Площадка имеет слабый уклон (2–3°) на восток и сложена валунными суглинками водно-ледникового генезиса, оторфованными (5–30 см) с поверхности. Окружающая территория расположена в области субарктического морского климата и представлена типичными кочкарными тундрами на равнинных участках, горными и лишайниковыми тундрами в предгорьях до высот 200–300 м над ур. моря и гольцами на более высоких отметках. Более детальное описание природных условий района исследований и площадки CALM представлено в работе [Маслаков и др., 2024].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сведения о зимних и летних осадках за 2000–2023 гг. с суточным разрешением были получены из специализированных массивов для климатических исследований ВНИИГМИ–МЦД [<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>] для ближайшей метеостанции, расположенной в пос. Уэлен (66°10' с.ш., 169°50' з.д.) в 87 км к северу от района исследований. Данные о среднесуточной температуре воздуха подготовлены по реанализу пятого поколения Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5, имеющего шаг сетки 0.25×0.25° [Hersbach et al., 2023]. Для подготовки значений среднесуточной температуры выбран набор данных ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Из него получен ряд значений температуры воздуха на уровне 2 м с 01.01.2000 г. по 06.10.2024 г. в стандартные метеорологические сроки (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 час UTC), затем

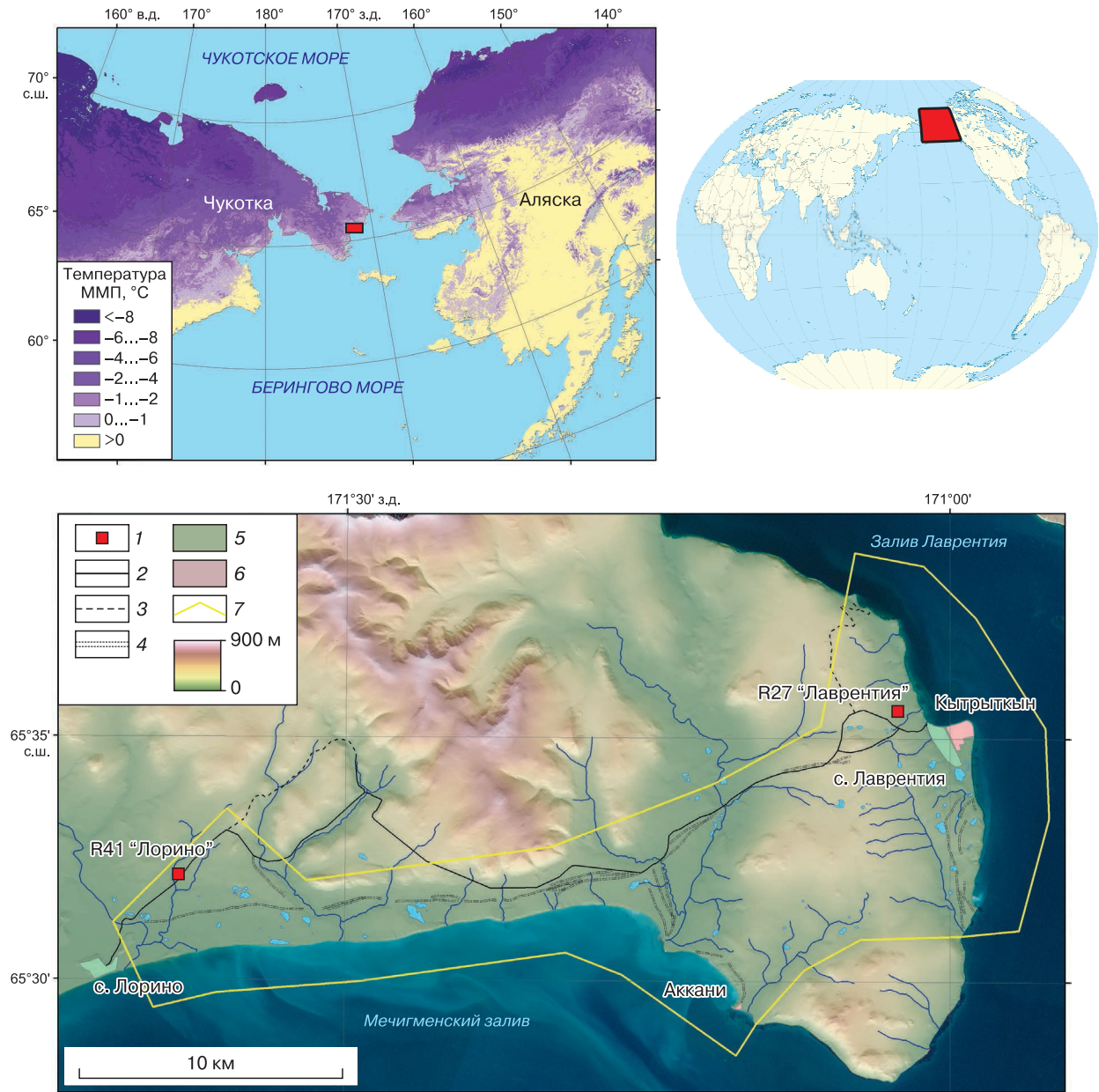


Рис. 1. Расположение площадки CALM “Лаврентия”.

1 – площадки CALM “Лаврентия” и “Лорино”; 2 – действующие дороги; 3 – заброшенные дороги; 4 – пути вездеходов; 5 – жилые поселения; 6 – заброшенные поселения; 7 – граница научного полигона “Приморские равнины Восточной Чукотки”.

выполнено осреднение по суткам. При скачивании выбран ближайший к площадке CALM узел сетки (65°50' с.ш., 171° з.д.).

Полученные данные были использованы для расчета количества осадков и индексов таяния (суммы положительных среднесуточных температур воздуха, Degree Days of Thawing – DDT) и промерзания (суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха, Degree Days of Freezing – DDF) для теплых и холодных сезонов

2000–2023 гг. Теплый период соответствует периоду оттаивания почвы и развития сезонноталого слоя, поэтому сумма положительных суточных температур воздуха, т. е. индекс таяния, хорошо согласуется с мощностью СТС при различных почвенных и растительных условиях и широко используется в геокриологических исследованиях [Nelson, Outcalt, 1987; Grebenets et al., 2021]. Индекс промерзания является характеристикой суровости предшествующей зимы и наряду со снеж-

ным покровом определяет температурное поле СТС в начале периода оттаивания почвы.

Наблюдения за глубиной сезонного оттаивания в пределах площадки “Лаврентия” начались в 2000 г. и выполняются в соответствии с протоколом CALM [Brown et al., 2000] мерзлотным щупом в узлах площадки. Измерения проводятся с четырехкратной повторностью с точностью 1 см и временным интервалом 1 месяц, что позволяет за теплый сезон (июнь–сентябрь) проводить 2–4 измерения, получая сведения как о межгодовых вариациях максимальной глубины оттаивания, так и о внутрисезонной динамике мощности СТС.

Одновременно с измерениями мощности СТС определяются величины относительных вертикальных колебаний дневной поверхности. При измерениях определяются высоты металлических марок (реперов), вмороженных в ММП на глубину не менее 50 см и установленных в узлах площадки CALM в 2003 г. – всего 121 репер (рис. 2). Измерение высоты репера производится с двух сторон рулеткой с точностью 1 мм, с упором на плоский диск, позволяющий минимизировать ошибку, связанную с неровностью поверхности и наличием мягкого мохового покрова. Анализ собранных результатов состоял в последовательном определении величины относительных колебаний дневной поверхности относительно марок за каждый период наблюдений ($\Delta\eta$). Таким образом, за 2003–2024 гг. было выполнено 66 измерений высоты

вмороженных металлических марок, позволяющих детально рассмотреть многолетние вариации дневной поверхности в пределах площадки CALM.

Важной частью проведения исследований является исключение или минимизация эффекта выпучивания реперов во время осенне-зимнего промерзания сезонного слоя. Для этой цели в конце теплого сезона (август–сентябрь) после измерения высоты марок осуществлялась оценка их устойчивости перед следующим сезоном промерзания путем оказания выдергивающей нагрузки. В случае если марка подавалась вверх, производилось ее перезабивание кувалдой на 30–50 см с последующим измерением новой высоты. Предыдущее измерение при этом исключалось из дальнейших вычислений. Оценка устойчивости марок на воздействие сил морозного пучения выполнялась на основании [Свод правил..., 2020]. Было рассчитано, что даже при максимальной глубине протаивания в 1 м в суглинистом субстрате сила выпучивания металлической марки диаметром 2 см, заглубленной всего на 10 см ниже подошвы СТС, составит 0.628 кН, в то время как расчетное значение силы, удерживающей марку от выпучивания, будет больше и составит 0.742 кН. Таким образом, применяемая методика оценки вертикальных движений земной поверхности по высоте металлических марок, если не исключает, то сводит к минимуму эффект от их выпучивания в период осенне-зимнего промерзания пород СТС.

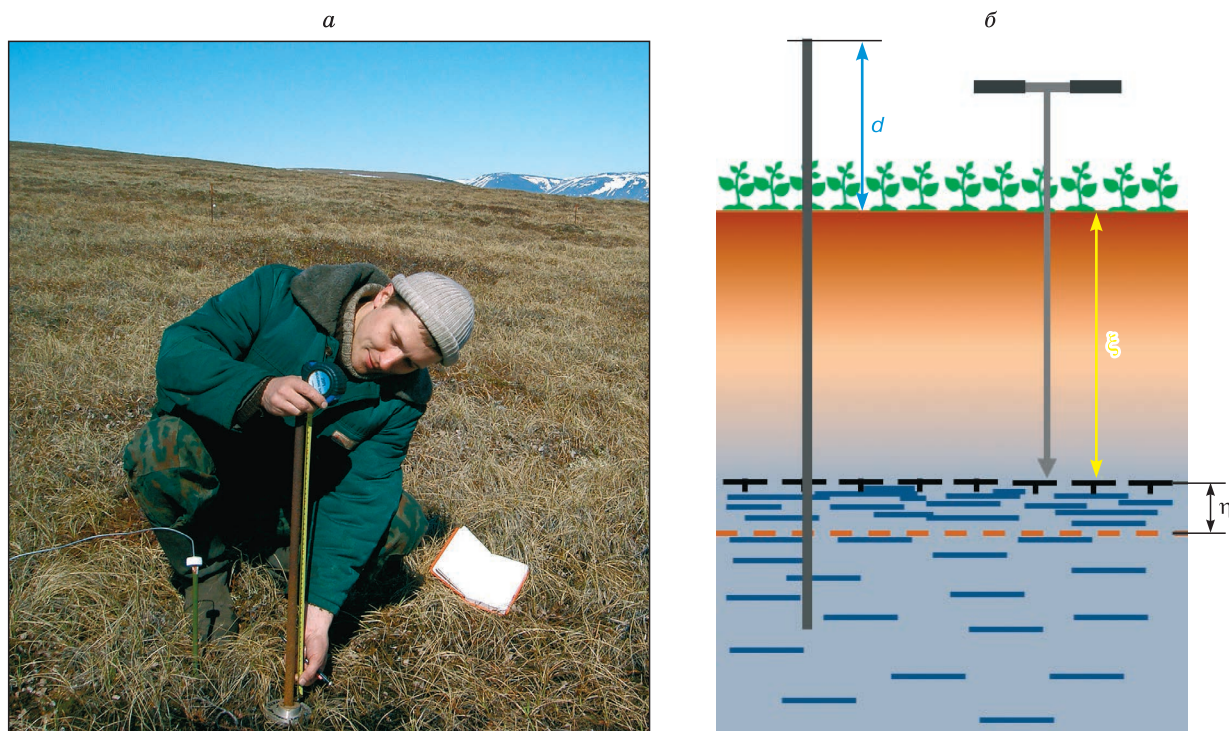


Рис. 2. Измерение высоты вмороженного репера в начале июня (а) и схема проводимых измерений (б). Фото Г.М. Зеленского, 2003 г. d – измеряемая высота кола; ξ – мощность СТС; η – сильнольдистый переходный слой ММП.



Рис. 3. Взаимное расположение площадки CALM “Лаврентия” и скважин.

Геодезические измерения поверхности (нивелирование, тахеометрическая съемка) производились в узлах площадки в 2006, 2012, 2018 и 2023 гг. в условной системе координат и высот, за исключением 2012 г., когда пространственная и высотная привязка производилась к реперной сети автодороги “Лаврентия–Лорино”, расположенной в 700 м к юго-западу от площадки. Измерения высоты поверхности осуществлялись в узлах площадки – всего 121 измерение. С целью сопоставления полученных распределений высот узлов площадки за разные годы были выполнены поправочные расчеты. Среднее значение высоты всех точек площадки 2012 г., имеющей привязку к абсолютной системе координат, сравнивалось со средней высотой точек, полученной по результатам топосъемок 2006, 2018 и 2023 гг. Полученная разница была поправкой на высоту поверхности (Δh). Поправка на изменение высоты дневной поверхности в результате сезонной осадки/пучения пород ($\Delta \eta$) рассчитывалась как сумма изменений высоты замороженных колева за рассматриваемые отрезки времени. Таким образом, результаты геодезических измерений последовательно приводились к средней высоте поверхности на 2012 г. с поправкой на $\Delta \eta$ за периоды наблюдений [Маслаков и др., 2024].

В летний период 2024 г. при помощи малого БПЛА (DJI Mini 3 Pro) была выполнена аэрофотосъемка площадки с высоты 50 м. В результате обработки снимков была получена полная трехмерная модель поверхности, ставшая основой для построения ортофотоплана и цифровой модели

местности (ЦММ) с горизонтальным разрешением 3 см.

Для характеристики поверхностных рыхлых отложений вблизи площадки CALM “Лаврентия”, в 2019–2020 гг. было пробурено несколько неглубоких скважин, из которых с интервалом 10–15 см были отобраны пробы на влажность, а также детально описаны керны (рис. 3). Скважина 2019-01 расположена в 100 м к юго-западу от юго-западного угла площадки на склоне увала, ее глубина составила 1.74 м при глубине оттаивания 0.8 м (конец августа). Скважины 2019-02 и 2019-03 были пробурены в 10–15 м от юго-восточного угла площадки, в пределах ровной поверхности, покрытой торфом и оторфованным суглинком. Их глубина составила 1.15 и 1.3 м при глубине оттаивания почвы на конец августа 0.60 и 0.63 м соответственно. Скважина 2020-06B была пробурена в середине сентября 2020 г. в 300 м к югу от площадки CALM, примерно на том же высотном уровне, на пологом склоне увала. Глубина скважины составила 1.8 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вариации климатических параметров и мощности СТС

Теплый период года, когда среднесуточные температуры превышают 0 °С, на Чукотском полуострове обычно длится с начала июня по конец сентября. На рис. 4 представлена динамика суммы положительных и отрицательных среднесуточных

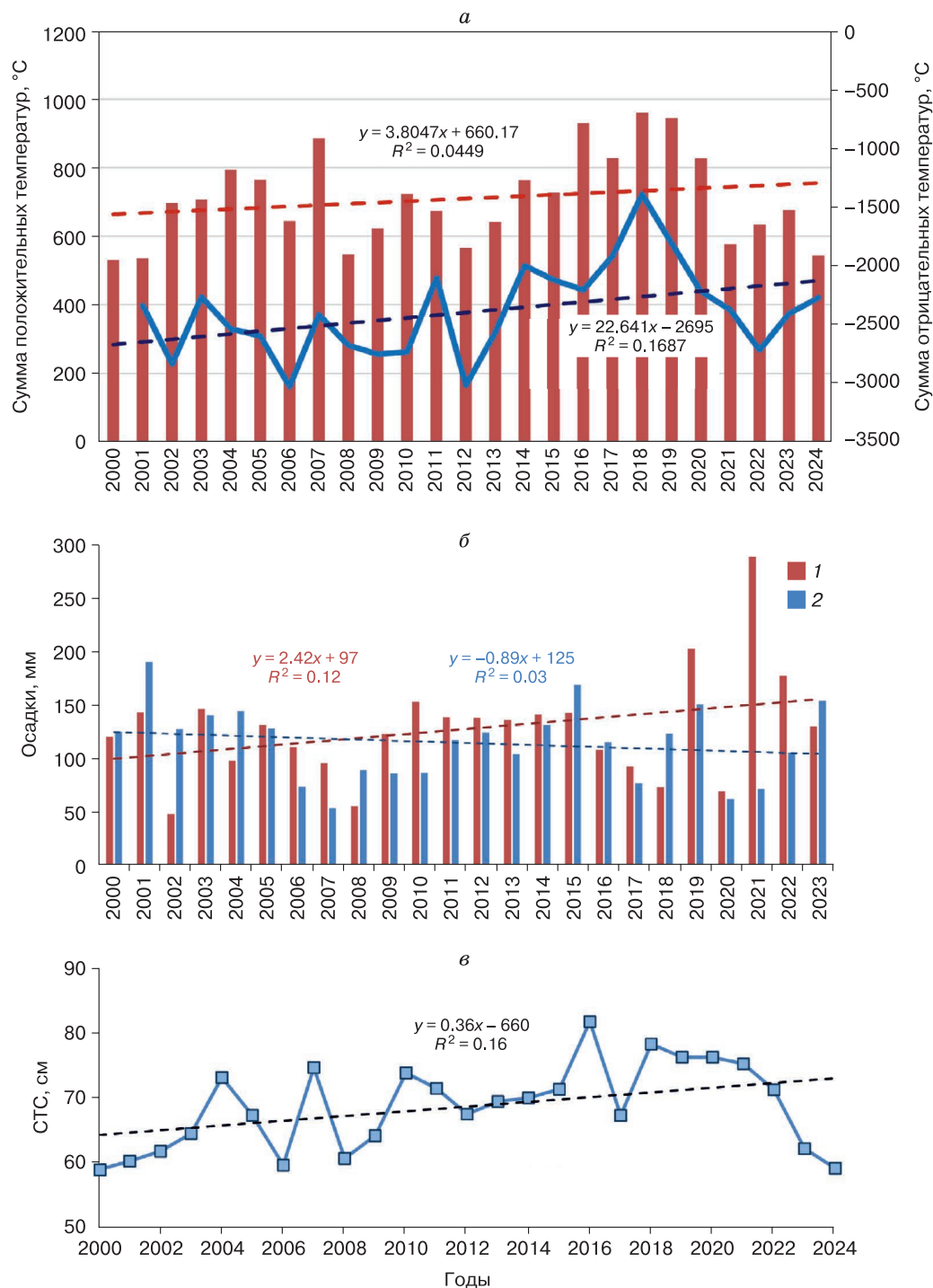


Рис. 4. Динамика суммы положительных (1) и отрицательных (2) среднесуточных температур по данным реанализа (а), количества летних и зимних осадков по метеостанции Уэлен (б) и максимальных глубин сезонного оттаивания почвы на площадке “Лаврентия” за 2000–2024 гг. (в).

температур за 2000–2024 гг. Наиболее холодным теплым периодом было лето 2000 г. (529 градусо-дней) и 2024 г. (542 градусо-дней), наиболее жаркими летними периодами отмечены 2018 и

2019 гг., когда сумма положительных среднесуточных температур достигала 960 и 944 градусо-дней соответственно. Направленного тренда в термических характеристиках летних сезонов за рассмат-

риваемый период не отмечается, однако можно выделить положительные и отрицательные аномалии летней теплообеспеченности относительно среднего значения (705 градусо-дней), имеющие длительность 4–7 лет. Периодами положительных аномалий, соответствующими более теплым летним сезонам, являются 2002–2007 и 2016–2020 гг. Периоды отрицательных аномалий, для которых отмечаются прохладные летние сезоны, относятся к 2008–2015 и 2020–2024 гг. Многолетний тренд изменения теплообеспеченности как в теплый, так и в холодный периоды слабopоложительный, однако ввиду большой межгодовой вариабельности статистически не значим ($p > 0.05$).

Количество осадков существенно варьирует из года в год. Самыми засушливыми летними сезонами были 2018 и 2020 гг., когда выпало всего 70 мм осадков. Летом 2021 г., напротив, выпало почти 300 мм. Несмотря на то что наблюдается тренд на рост количества летних осадков (см. рис. 4), его межгодовая изменчивость также не позволяет говорить о его статистической значимости.

Следует отметить, что хотя современные погодные характеристики не имеют значимых тенденций за рассматриваемый период, в более обширном временном масштабе для этой территории с 1950-х годов [Maslakov et al., 2020] наблюдается устойчивое потепление приземной температуры воздуха. Среднегодовые температуры воздуха с этого времени повышаются на 0.06–0.07 °C/год с ускорением до 0.11–0.12 °C/год в 1990-х годах (по результатам наблюдений с четырех метеостанций Чукотского полуострова и реанализа NCEP/NCAR). Эти изменения в основном обусловлены повышением зимних температур воздуха. Однако летние термические условия также существенно изменились: средняя сумма положительных среднесуточных температур за 1950–1970 гг. для метеостанции Уэлен составляет 498 °C, а за 2000–2020 гг. – 704 °C. Таким образом, с середины XX в. лето на Чукотском полуострове стало существенно теплее.

Результаты мониторинга максимальной глубины сезонного оттаивания почв и верхних горизонтов мерзлых пород почвенно-мерзлотного комплекса на площадке “Лаврентия” за 2000–2024 гг. представлены на рис. 4, в. Несмотря на в целом растущую мощность СТС, за последние четыре года (2021–2024) она резко упала до минимума за весь период наблюдений (59 см). Коэффициент детерминации (R^2) между СТС и квадратным корнем из суммы положительных среднесуточных температур составляет 0.42, что свидетельствует о влиянии других природных факторов, помимо летней температуры воздуха, на глубину сезонного оттаивания почвы. Анализ од-

новременного влияния нескольких метеопараметров представлен в виде регрессионного уравнения для площадки CALM “Лаврентия”:

$$d_{\text{л}} = 0.61\sqrt{\text{DDT}} + 0.05P_s - 0.06P_w - 0.5\sqrt{\text{DDF}} + 78.1, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.62 \quad (n = 23),$$

где d – глубина максимального сезонного оттаивания почвы, см; $\sqrt{\text{DDT}}$ и $\sqrt{\text{DDF}}$ – квадратные корни из сумм положительных и отрицательных среднесуточных температур соответственно; P_s – величина летних осадков, мм; P_w – величина зимних осадков в предшествующий сезон, мм.

Учет осадков и зимних температур воздуха позволил повысить коэффициент детерминации метеоусловий с максимальной мощностью СТС до 0.62. Вопреки общепринятым представлениям о том, что глубина сезонного оттаивания определяется метеопараметрами теплового периода, выявлено, что на межгодовую вариацию мощности СТС в значительной степени влияют зимние характеристики предшествующего сезона – количество осадков и суровость (DDF) зимнего периода. Коэффициенты при этих параметрах в уравнении (1) имеют сопоставимые величины по сравнению с летними параметрами.

Криолитологическое строение СТС и ММП

Литологический состав, криолитологическое строение и весовая влажность/льדיстость пород, полученная по кернам из скважин в районе площадки “Лаврентия”, представлены на рис. 5. Поверхностные отложения в основном представлены суглинком серым и сизым, часто с включением слабоокатанного мелкообломочного материала, с поверхности суглинок оторфован или перекрыт слоем торфа мощностью до 30 см. Весовая влажность пород определялась только в скв. 2020-06В. В пределах оттаявшей части СТС весовая влажность (W_{tot}) варьировала в пределах 30–50 %, увеличиваясь книзу до 100 %. В верхних горизонтах ММП весовая влажность пород превышала 80 %, пик значений приходился на прослой торфа в 25 см ниже подошвы СТС на момент бурения и составил 650 % (см. рис. 5).

Криолитологическое строение пород в скважинах разнообразное. Для скв. 2020-06В характерна преимущественно слоистая тонкошпировая криотекстура. Для скважин 2019 г. неоттаявшая часть СТС характеризуется массивной криотекстурой в суглинках и слоистой криотекстурой в торфе.

Переходный слой ММП отчетливо выражен в криолитологическом строении пород, что прояв-

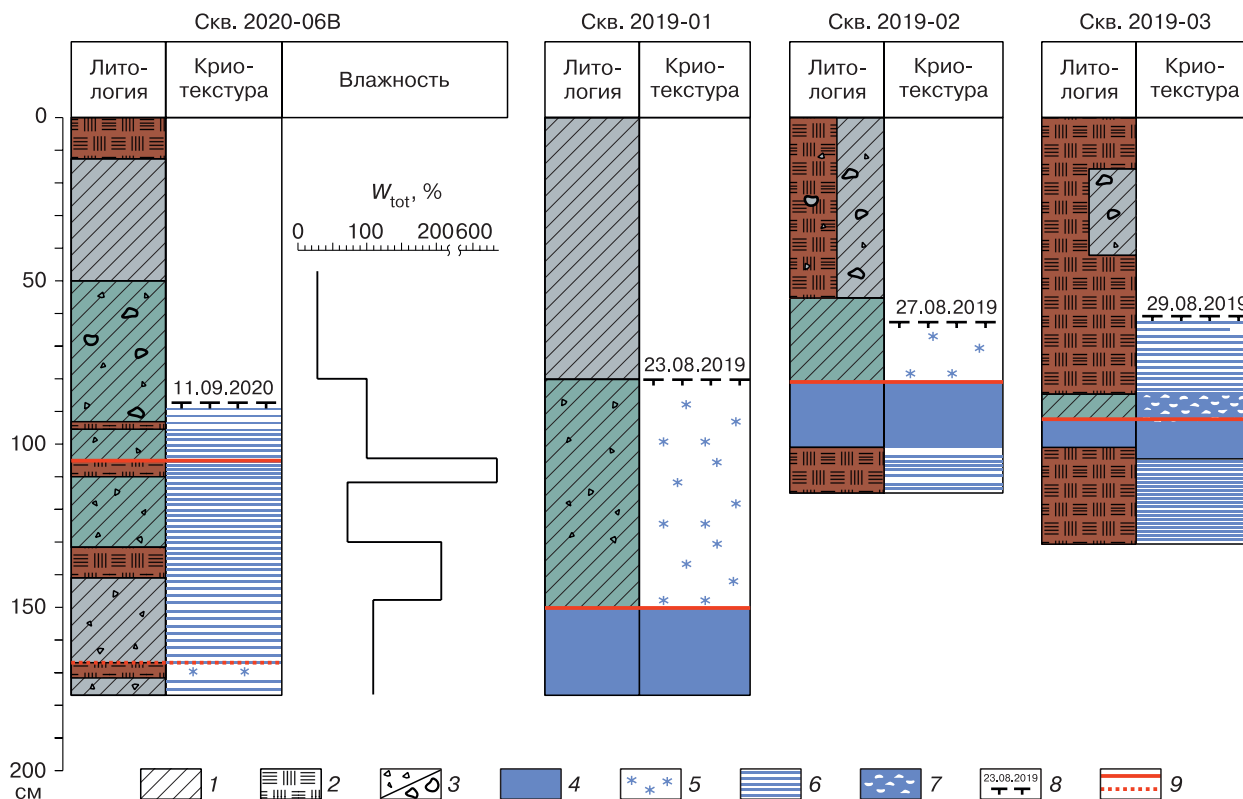


Рис. 5. Литологические колонки и криогенное строение пород вблизи площадки CALM “Лаврентия”.

1 – суглинок; 2 – торф; 3 – дрова/щебень; 4 – лед; 5–7 – криотекстуры (5 – массивная, 6 – слоистая, 7 – атакситовая); 8 – подошва CTC на момент бурения; 9 – верхняя и нижняя границы переходного слоя ММП.

ляется во всех кернах скважин. Для скв. 2020-06В он представлен в виде сильнольдистого ($W_{\text{tot}} = 70\text{--}200\%$) горизонта суглинка с прослоями сильнольдистого ($W_{\text{tot}} = 200\text{--}650\%$) торфа с частослоистой криотекстурой на отметках 100–145 см (см. рис. 5); для скважин 2019-01 и 2019-02 он представлен в виде прослоя чистого льда мощностью 25–30 см, перекрытого суглинком с массивной криотекстурой; в скв. 2019-03 переходный слой представлен сильнольдистым суглинком с атакситовой криогенной текстурой и прослоем чистого льда общей мощностью 30 см.

Вариации вертикальных движений дневной поверхности

Регулярные измерения относительной высоты марок, установленных в узлах площадки CALM “Лаврентия”, позволил подробно выявить временные и пространственные вариации высоты дневной поверхности в результате процессов осадки и пучения пород.

Среднее значение опускания дневной поверхности в результате сезонной осадки оттаивающих пород за период 2003–2024 гг. составило 2.4 см, максимальное значение было зафиксировано в

2004 г. и составило 6 см, минимальное – подъем на 1.7 см в 2021 г. Суммарное опускание дневной поверхности в пределах площадки CALM за 20 лет составило 50.5 см. Примечательно, что для узлов площадки с различной глубиной оттаивания тенденции к опусканию поверхности имели разную величину (рис. 6): при относительно глубоком сезонном протаивании (более 70 см) величина суммарного опускания поверхности достигла 80.7 см, а для узлов с неглубоким оттаиванием почвы (менее 50 см) – всего 37 см.

Сопоставление результатов разновременных геодезических съемок 2006–2023 гг. с измерениями высоты кольев относительно дневной поверхности в узлах площадки позволило определить пространственные вариации в динамике высоты дневной поверхности (рис. 7). За указанный период максимальное опускание дневной поверхности составило 69 см, минимальное – 12 см, среднее – 39 см. Характерно, что участок наибольшего опускания дневной поверхности хорошо соотносится с ложбиной стока, проходящей по площадке с юго-западного угла на восток (см. рис. 7). Участки с повышенными значениями опускания поверхности также представлены очагово в центральной

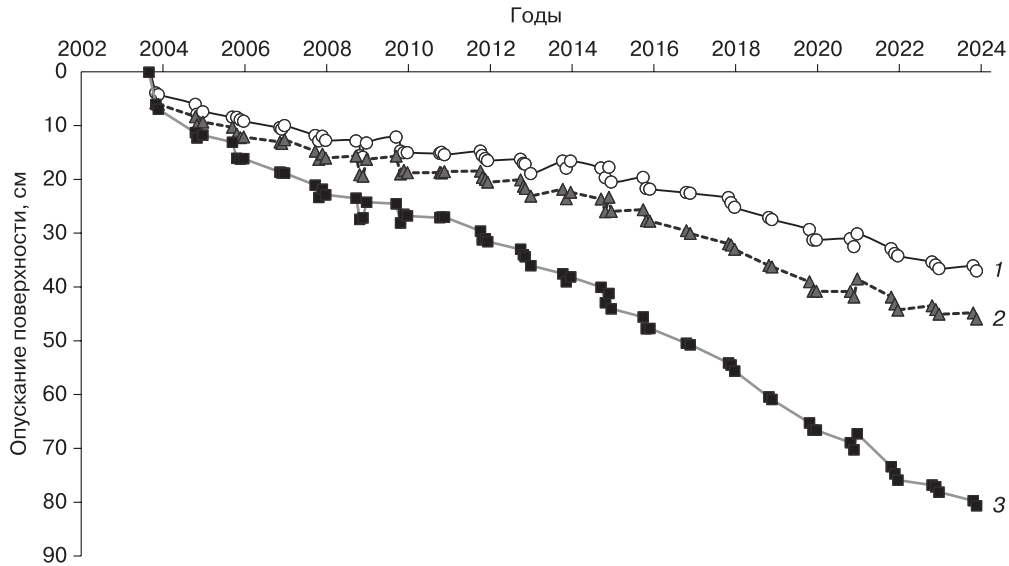


Рис. 6. Динамика вертикальных движений дневной поверхности за 2003–2024 гг. для узлов площадки CALM с различными значениями максимальной мощности сезонноталого слоя:

1 – менее 50 см; 2 – 50–70 см; 3 – более 70 см.

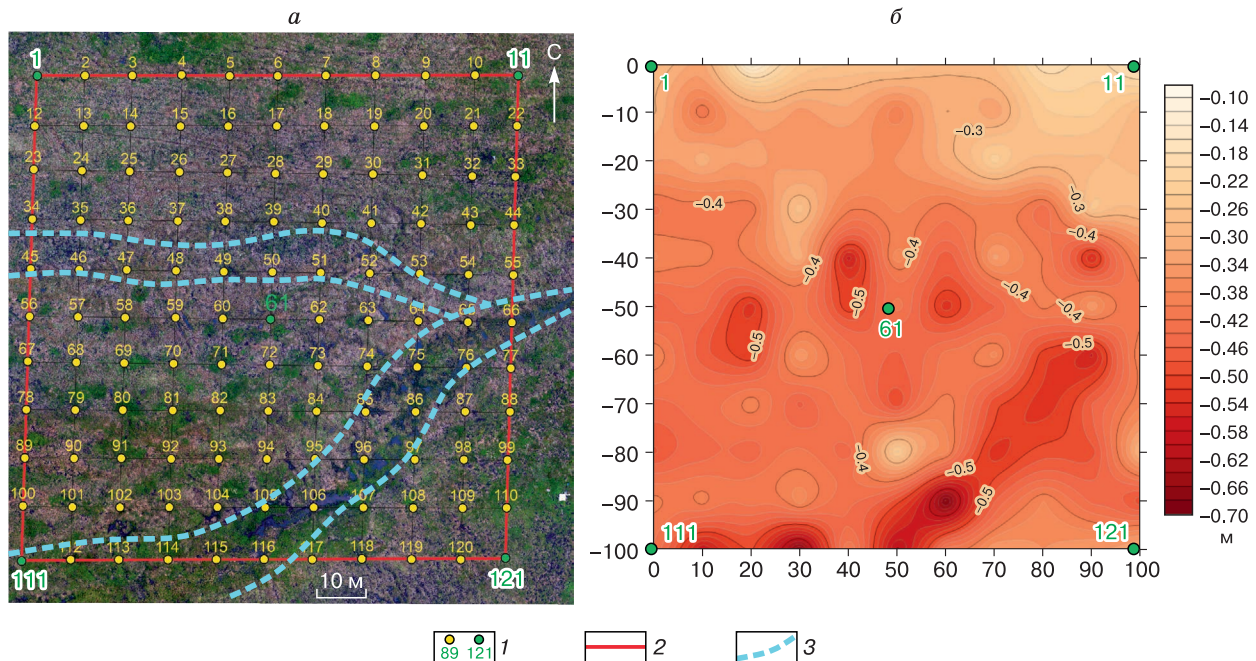


Рис. 7. Ортофотоплан площадки CALM “Лаврентия” (а), пространственные вариации опускания дневной поверхности за 2006–2023 гг. (б).

1 – узлы (реперы) площадки; 2 – граница площадки; 3 – контуры ложбин стока.

части площадки (узлы 57, 49, 62), в пределах которой расположена ложбина стока, простирающаяся с запада на восток, но гораздо слабее выраженная как в рельефе, так и в растительном покрове. Наименьшее опускание дневной поверхности зафиксировано в северо-восточном углу площадки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика скорости опускания дневной поверхности

На кривую изменения высоты дневной поверхности на протяжении 2004–2024 гг. удалось наложить полиномиальную линию тренда 4-й сте-

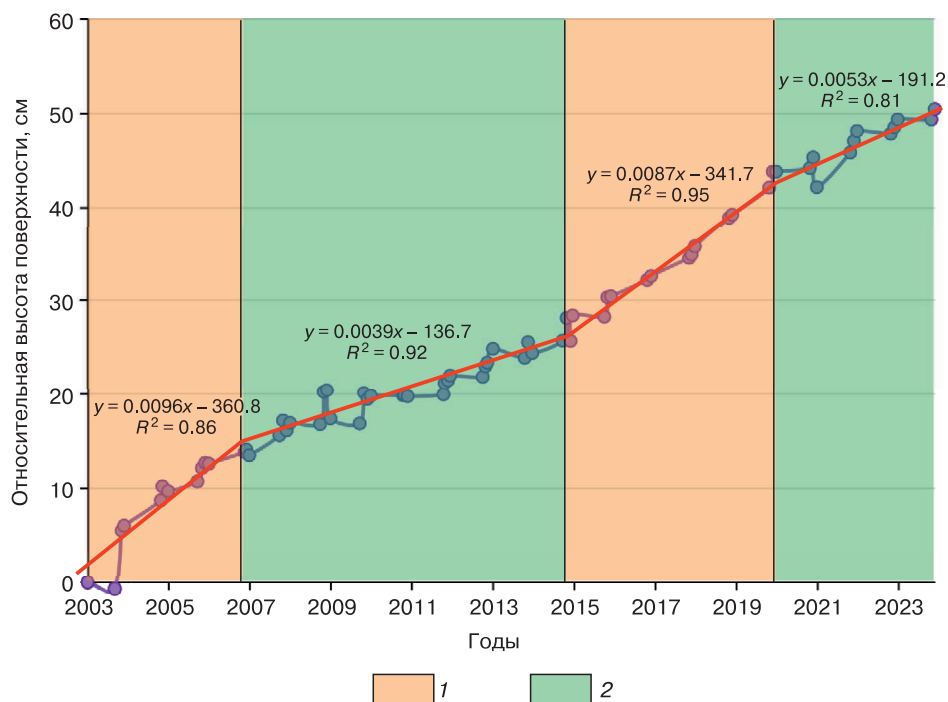


Рис. 8. Динамика изменения средней высоты поверхности в узлах площадки CALM “Лаврентия” за 2003–2024 гг.

Периоды повышенной (1) и пониженной (2) скорости опускания поверхности.

пени, на которой были выделены участки, характеризующиеся однородной (линейной) скоростью изменений (рис. 8). Полученные временные отрезки совпали с выделенными ранее периодами положительных и отрицательных аномалий сумм положительных среднесуточных температур воздуха (DDT). Таким образом, в результате многолетних полевых наблюдений за вертикальными движениями дневной поверхности на площадке CALM “Лаврентия” была выявлена зависимость скорости опускания дневной поверхности в результате осадки оттаивающих пород от летней теплообеспеченности. В периоды положительных аномалий DDT (относительно теплых летних сезонов) отмечается повышенная скорость опускания поверхности 3.2–3.5 см/год, а в периоды отрицательных аномалий (холодные летние сезоны) скорость опускания снижается до 1.4–1.9 см/год. Зависимость скорости вертикальных движений от погодных условий летнего периода отмечалась на Центральном Ямале [Bartsch *et al.*, 2019], когда аномально жаркое лето 2016 г. привело к сезонной осадке, вдвое большей по амплитуде, чем в последующие два года. Применение радарных снимков в данном исследовании позволило детально проследить внутрисезонную динамику вертикальных движений дневной поверхности для различных типов покровов, однако применение снимков Sentinel-1 в С-диапазоне не позволяет выполнять

анализ межсезонных вариаций отметок поверхности ввиду слишком слабой когерентности сигнала между теплыми сезонами.

Динамика продвижения фронта оттаивания

Сопоставление индекса оттаивания (DDT) с максимальной мощностью CTC с учетом сезонной осадки оттаивающих пород и без нее показало, что добавление величины опускания дневной поверхности в течение теплого сезона незначительно, но все же улучшает взаимосвязь между CTC и DDT (рис. 9). Более значительная роль сезонных вариаций

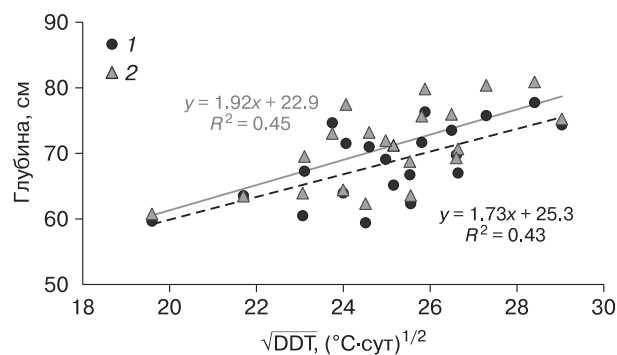


Рис. 9. Зависимость между летней теплообеспеченностью (DDT) и измеренной мощностью сезонноталого слоя без учета осадки (1) и с ее учетом (2) за период с 2004 по 2024 г. ($n = 21$).

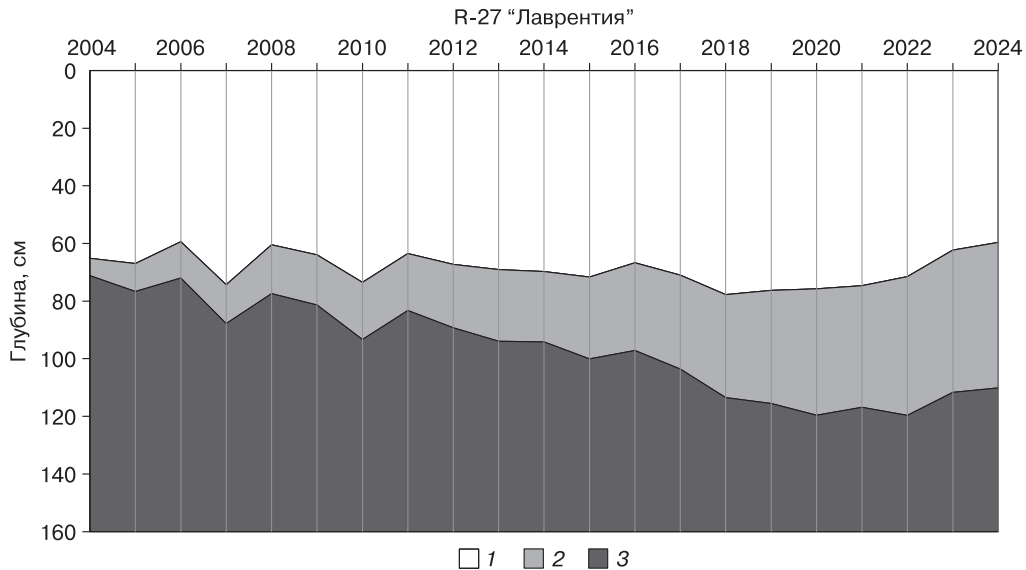


Рис. 10. Динамика мощности сезонноталого слоя и отметок кровли многолетнемерзлых пород на площадке CALM “Лаврентия” за 2004–2024 гг.

1 – сезонноталый слой; 2 – слой осадки; 3 – многолетняя мерзлота.

ций отметок поверхности была зафиксирована на стационарных площадках северо-запада Канады [O'Neill et al., 2023], где учет эффекта от осадки оттаивающих пород позволил увеличить коэффициент детерминации (R^2) на 0.19–0.28.

Наблюдения за вертикальными движениями дневной поверхности (в среднем 2.4 см/год) заметно превышают наблюдаемые тренды в росте мощности СТС, полученные по результатам измерений шупом (0.4 см/год). Последние ведутся от меняющейся дневной поверхности и не учитывают скрытый эффект осадки оттаивающих пород. Полученные сведения поднимают вопрос о выделении нового параметра, определяемого при мониторинге мощности СТС на площадках CALM в пределах распространения сильнольдистых пород. Это скорость опускания кровли ММП или скорость продвижения фронта оттаивания, которая складывается из мощности СТС и осадки оттаивающих верхних горизонтов пород почвенно-мерзлотного комплекса. Недоучет эффекта осадки для равнинных территорий криолитозоны, сложенных сильнольдистыми породами, может привести к существенному расхождению результатов мониторинга с реальной картиной и к неправильным выводам о реакции криолитозоны на климатические изменения. В данном случае, на фоне стабильности мощности СТС за 2004–2024 гг., кровля ММП заметно опустилась (рис. 10). Таким образом, отмечается недооценка реакции многолетней мерзлоты на климатические изменения лишь за счет изменения мощности СТС. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что на фоне

усиливающегося потепления климата высоких широт компенсационные механизмы, обусловленные реакцией ландшафтных условий (закустаривание тундры, рост мощности мохового покрова и т. д.), не позволяют в полной мере восстанавливать защитный (переходный) слой ММП. В периоды относительного похолодания летних периодов сокращение мощности СТС и сопровождаемый этим квазисинкриогенез не восстанавливают высотные отметки дневной поверхности в результате осадки оттаивших пород, а лишь замедляют устойчивый тренд на опускание поверхности.

Влияние природных факторов на осадку пород

Помимо отмеченной выше летней теплообеспеченности, на вертикальные движения дневной поверхности могут влиять и другие природные факторы, которые можно разделить на две большие группы: пространственные и временные.

Среди пространственных факторов в первую очередь выделяются ландшафтные условия, определяющие как литологию и влажность сезонноталого слоя, так и характер напочвенных покровов. На примере Центрального Ямала показано, что наименьшие амплитуды внутрисезонных вертикальных движений для этой территории характерны для ветровых надувов на песчаной литогенной основе и заболоченные кустарничково-осоковые тундры, в то время как поймы и участки сухой мохово-лишайниковой тундры характеризуются наибольшими значениями летней осадки поверхности [Bartsch et al., 2019]. В окрестностях станции

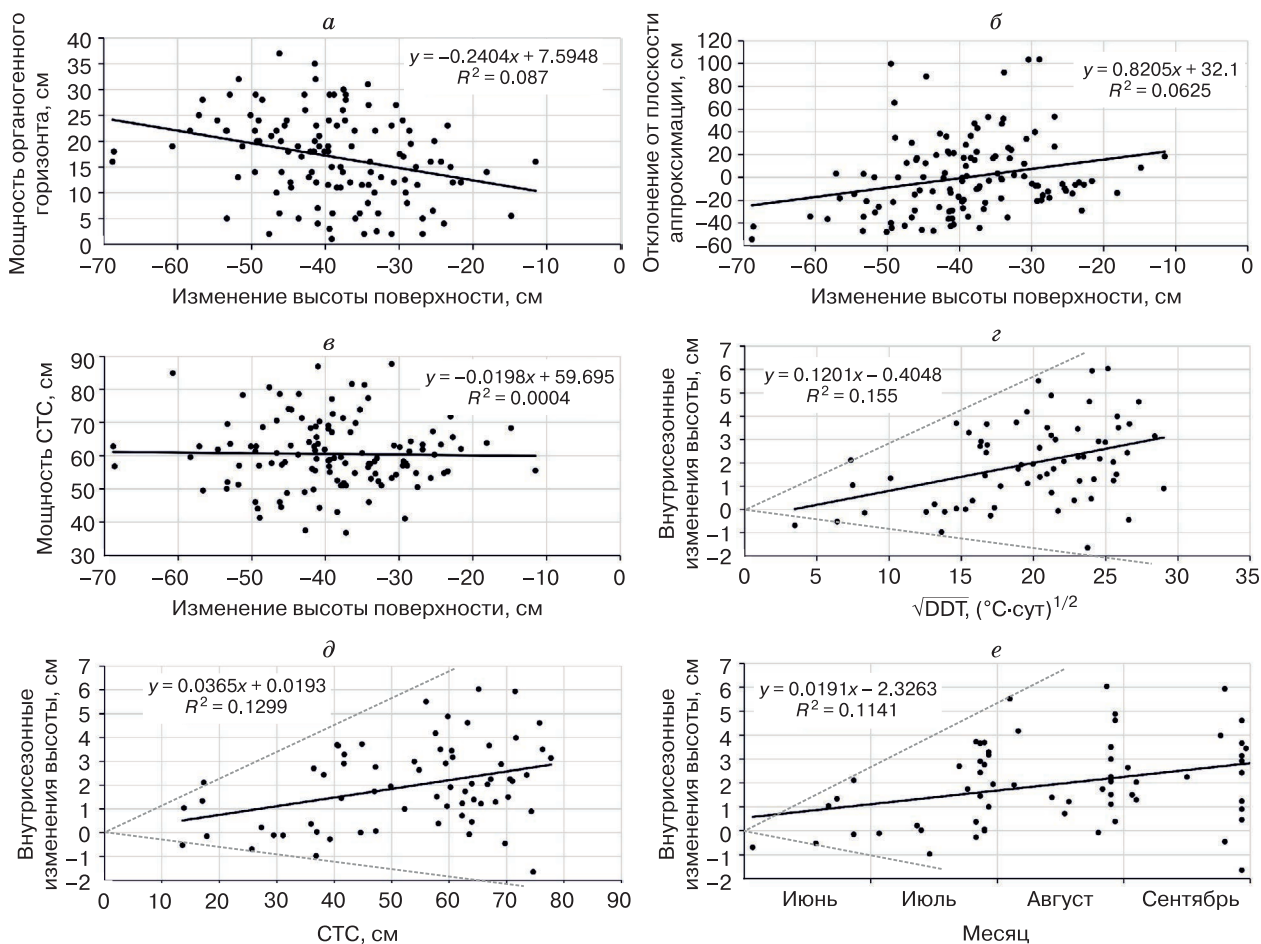


Рис. 11. Зависимости распределения вертикальных движений дневной поверхности от природных факторов в узлах площадки CALM “Лаврентия”.

a – мощности органогенного горизонта; *б* – положения в рельефе; *в* – максимальной глубины оттаивания (*a–в* – период 2006–2023 гг.); *з* – летней теплообеспеченности; *д* – внутрисезонной изменчивости мощности СТС; *е* – длительности теплового сезона. Сплошные линии – линии тренда, пунктирные – граница диапазона значений.

Тулик (Аляска, США) для дренированных участков амплитуда сезонных колебаний поверхности в среднем составляла 2 см, в то время как в увлажненных депрессиях она достигала 3 см [Chen et al., 2020]. Результаты исследований вертикальных движений поверхности на основе данных радарных спутников TerraSAR-X и Sentinel-1 в перигляциальной области острова Западный Шпицберген (Норвегия), совмещенные с геоморфологическими полевыми исследованиями, показали отчетливую зависимость сезонных вертикальных движений поверхности от различных форм рельефа и типов отложений [Rouyet et al., 2019].

Для площадки CALM “Лаврентия” были выделены три пространственных фактора, которые могут оказывать влияние на величину вертикальных смещений поверхности в каждом узле площадки: мощность поверхностного органогенного горизонта, среднееголетняя максимальная глу-

бина оттаивания и положение узла в рельефе (рис. 11, *a–в*). Мощность органогенного горизонта почвы определялась для каждого узла площадки ландшафтным щупом с точностью до 1 см [Zamolodchikov et al., 2004]. Максимальная глубина оттаивания осреднялась для каждого узла площадки за период 2000–2024 гг. Положение узла в рельефе определялось как отклонение от плоскости аппроксимации, полученной по уравнению

$$AX + BY + Z = 0, \quad (2)$$

где X, Y – координаты каждого из 121 узла площадки (зависимые величины); Z – высота узлов (независимая величина).

Положительное значение отклонения от плоскости свидетельствует о положении узла на возвышенности, отрицательное – о положении в депрессии. Результаты анализа (см. рис. 11, *a–в*) показали, что несмотря на наблюдаемые частные

закономерности (повышенные скорости опускания в ложбинах стока), в регулярной сетке узлов, расставленных через каждые 10 метров, влияние выделенных пространственных факторов крайне незначительно ($R^2 < 0.1$).

Сезонными факторами, оказывающими влияние на вертикальные движения поверхности в криолитозоне, могут служить как метеопараметры, так и изменение мощности СТС во времени. Например, ежемесячное нивелирование на ключевом участке вблизи Цинхай-Тибетской железной дороги (КНР) показало четыре отчетливых этапа в годовом цикле вариаций отметок дневной поверхности: летнюю осадку (июнь–август), период стабильных отметок (сентябрь), осенне-зимнее пучение (октябрь–январь) и зимне-весеннюю стабильность (февраль–май) [Chen et al., 2020].

Для площадки “Лаврентия” были выделены три временных параметра (см. рис. 11, *z–e*): квадратный корень из суммы положительных среднесуточных температур (индекс DDT), средняя по площадке глубина сезонного оттаивания в течение теплого сезона, юлианский день года. Индекс DDT характеризует количество тепла, получаемого почвой из атмосферы, а его квадратный корень хорошо согласуется (при прочих равных условиях) с глубиной сезонного оттаивания почвы.

Однако ни СТС, ни $\sqrt{DDT}$ не демонстрируют значимой корреляции со средней по площадке осадкой почвы. Пунктирными линиями показан расширяющийся по мере развития теплого сезона коридор значений осадки, соответствующий определенным значениям рассматриваемых параметров. Та же картина характерна и для юлианских дней (см. рис. 11, *e*) – с 1 июня (153-й день) до 25 сентября (270-й день) диапазон значений зафиксированной средней осадки растет.

Полученная картина распределений демонстрирует, что величина сезонной осадки почвы на микро- и мезоландшафтном уровнях зависит не столько от мощности СТС или погодных условий летнего сезона, сколько от комбинации этих и других, не учтенных в данном исследовании условий. Такими условиями могут быть изменяющиеся год от года сроки начала и окончания теплого сезона, погодные условия осенне-зимнего промерзания пород СТС и положение фронта максимального оттаивания за предыдущий летний сезон.

Роль переходного слоя ММП в эволюции криогенного рельефа

Проведенные расчеты влияния выбранных пространственных и временных факторов на вариации отметок дневной поверхности на микро- и мезоландшафтном уровнях показали их незначительную роль в распределении вертикальных дви-

жений в пространстве и их проявление во времени. Вероятно, существует неявный фактор, оказывающий существенное воздействие на долгосрочную эволюцию рельефа кровли ММП и дневной поверхности. Этим фактором может быть переходный слой ММП, который залегает плащеобразно ниже среднемноголетнего слоя сезонного оттаивания. По-видимому, пространственная вариация амплитуды вертикальных движений в масштабе площадки CALM зависит в большей степени от криофациальных условий переходного слоя многолетней мерзлоты, которые могут не отражаться в ландшафтных условиях поверхности. Сезонные вариации летней осадки также определяются условиями промерзания нижней части СТС и формирования переходного слоя ММП: предзимняя влажность СТС определяет амплитуду осенне-зимнего пучения и льдистость пород СТС. Немаловажную роль играет состояние самого переходного слоя: успел ли он сформироваться в нижней части СТС за несколько предыдущих холодных периодов в виде сильнольдистого (и подверженного сильной осадке при оттаивании) горизонта или полностью оттаял в прошлый год, сформировав слой с массивной криотекстурой (например, в скв. 2019-01).

Исследование переходного слоя в окрестностях площадки CALM “Лаврентия” (в пределах приморских равнин Восточной Чукотки) показало, что его параметры могут сильно различаться в зависимости от литологии и генезиса отложений, в которых он сформирован [Maslakov et al., 2021]. Мощность переходного слоя варьирует от 0.1 до 1.2 м, весовая влажность мерзлых пород может достигать 1000 %, а криотекстуры могут быть как тонкошлюзовыми частослоистыми, так и атакситовыми, сетчатыми и линзовидными. Пестрая фациальная изменчивость переходного слоя продемонстрирована на относительно компактном участке тундры вокруг площадки “Лаврентия” (см. рис. 5).

Таким образом, несмотря на выявленные пространственные и временные вариации осадки оттаивающих пород в пределах площадки “Лаврентия”, статистически значимых факторов, определяющих эти вариации, обнаружено не было. Это позволяет выдвинуть гипотезу, что осадка оттаивающих пород, происходящая на фоне прогрессирующего потепления климата, на микро- и мезоландшафтном уровнях определяется параметрами переходного слоя, подстилающего слой сезонного оттаивания пород. Криофациальное разнообразие этого слоя определяется не столько современными ландшафтными условиями поверхности, сколько историей их эволюции в голоцене, а также условиями дренирования, литологией и генезисом подстилающих мерзлых пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате многолетних наблюдений за динамикой глубины сезонного оттаивания почвы и вертикальных движений дневной поверхности в пределах мониторинговой площадки CALM “Лаврентия” были определены пространственно-временные особенности деградации верхней части толщ многолетней мерзлоты. Накопленный фактический материал позволил провести статистический анализ влияния различных природных факторов на амплитуду осадки оттаивающих пород. Выполненное исследование позволяет сделать несколько выводов.

1. На фоне наблюдаемого потепления климата Арктики в пределах мониторинговой площадки CALM “Лаврентия”, отражающей природные условия увалистой водно-ледниковой равнины Восточной Чукотки, выявлено опускание дневной поверхности без формирования выраженных термокарстовых форм рельефа. Наиболее четко этот процесс проявился в углублении ложбин стока в пределах площадки. Скорость осадки оттаивающих пород, измеренная за 2004–2024 гг., увеличивается до 3.2–3.5 см/год в периоды относительно теплых летних сезонов и сокращается до 1.4–1.9 см/год в периоды прохладных летних сезонов. Вариации указанных величин превышают почти на порядок наблюдаемый тренд роста глубины сезонного оттаивания почвы (0.4 см/год), что свидетельствует о значительной недооценке темпов деградации мерзлых пород в этом регионе. Полученные результаты заставляют пересмотреть данные мониторинга сезонноталого слоя на других площадках CALM, расположенных на сильнольдистых отложениях, и разработать комплекс дополнительных исследований по учету скрытого эффекта от осадки оттаивающих пород.

2. Попытки выявить природные факторы, определяющие пространственно-временные вариации внутрисезонных колебаний дневной поверхности, обнаружили статистически незначимые взаимосвязи с выбранными характеристиками (положение в рельефе, мощность органогенного горизонта, глубина сезонного оттаивания почвы, день года). Это позволяет выдвинуть гипотезу, что в условиях прогрессирующего потепления климата необратимая осадка оттаивающих пород затрагивает подстилающие СТС мерзлые породы, от свойств которых и зависят пространственно-временные вариации вертикальных движений поверхности.

3. Результаты неглубокого бурения в окрестностях площадки CALM “Лаврентия” подтвердили наличие сильнольдистого переходного слоя ММП, за счет которого происходит наблюдаемое опускание дневной поверхности. Его мощность в некоторых местах может достигать 1.2 м, что со-

храняет потенциал к дальнейшему опусканию дневной поверхности и возможному формированию термокарстовых форм рельефа при дальнейшем потеплении климата. Выявление фациальных закономерностей распространения переходного слоя (и в целом – строения почвенно-мерзлотного комплекса) в различных ландшафтно-мерзлотных обстановках является целью дальнейших исследований для точного прогнозирования эволюции криогенных ландшафтов равнинных территорий криолитозоны Северного полушария.

Выявление пространственных закономерностей и ведущих факторов, определяющих параметры переходного слоя, представляется дальнейшим направлением исследований. Наряду с расширением спектра изучаемых природно-территориальных комплексов это позволит дать прогнозную оценку эволюции криогенных ландшафтов и рельефа для равнинных территорий криолитозоны в контексте продолжающегося потепления климата.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-17-00010).

Литература

- Баранов И.Я., Баулин В.В.** Влияние многолетнего промерзания на формирование геоморфологических уровней // Мерзлотные исслед., 1964, вып. IV, с. 285–291.
- Каневский М.З.** Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений северной Якутии: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004, 23 с.
- Коницев В.Н.** Внутриландшафтная реакция мерзлотных условий на современные изменения климата // Науч. альманах, 2003, № 1, с. 129–144.
- Коницев В.Н.** Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2009, № 4, с. 10–20.
- Мажитова Г.Г., Каверин Д.А.** Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в европейской части России // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 4, с. 20–30.
- Маслаков А.А., Замолдчиков Д.Г., Зеленский Г.М.** Эволюция микрорельефа на площадке CALM R-27 “Лаврентия” (Восточная Чукотка) на фоне современных климатических изменений // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России, 2024, № 11, с. 561–570.
- Маслаков А.А., Комова Н.Н.** Деградация льдистых отложений приморских равнин Восточной Чукотки при современных климатических условиях // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России, 2019, № 6, с. 113–117.
- Романовский Н.Н.** К теории термокарста // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология, 1977, № 1, с. 65–71.
- Романовский Н.Н.** Основы криогенеза литосферы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 36 с.
- Свод правил СП 25.13330.2020.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах (актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88). М., Госстрой России, 2020, 135 с.

Шыр Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск, Наука, 1988, 213 с.

Bartsch A., Leibman M., Strozzi T. et al. Seasonal progression of ground displacement identified with satellite radar interferometry and the impact of unusually warm conditions on permafrost at the Yamal Peninsula in 2016 // *Remote Sens.*, 2019, vol. 16, No. 11, p. 1–25.

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at global scale // *Nature Commun.*, 2019, vol. 10, No. 1, p. 1–11.

Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: Research designs and initial results // *Polar Geography*, 2000, vol. 24, No. 3, p. 165–258.

Chen J., Wu Y., O'Connor M., Cardenas M.B. et al. Active layer freeze-thaw and water storage dynamics in permafrost environments inferred from InSAR // *Remote Sens. Environ.*, 2020, No. 248, p. 1–12.

Grebenets V.I., Tolmanov V.A., Streletskiy D.A. Active layer dynamics near Norilsk, Taimyr peninsula, Russia // *Geography, Environment, Sustainability*, 2021, vol. 14, No. 4, p. 55–66.

Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S), Climate Data Store (CDS), 2023 (accessed: 12.11.2024).

Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D. et al. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North // *Polar Geography*, 2021, vol. 44, No. 3, p. 203–216.

Lupachev A.V., Gubin S.V. Soil-cryogenic complex: The evidence of Late Pleistocene–Holocene coevolution of permafrost and cryogenic soils // *Permafr. Periglac. Process.*, 2023, vol. 3, No. 34, p. 317–330.

Maslakov A.A., Egorov E.G., Zelensky G.M. et al. The transient layer of permafrost of the Eastern Chukotka coastal plains, NE Russia // *Proc. of the 26th Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions* (Moscow, Russia, 15–18 June 2021). Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2021, p. 1–8.

Maslakov A.A., Nyland K.E., Komova N.N. et al. Community ice cellars in eastern Chukotka: Climatic and anthropogenic influences on structural stability // *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, No. 3, p. 49–56.

Maslakov A., Shabanova N., Zamolodchikov D. et al. Permafrost degradation within Eastern Chukotka CALM sites in the 21st century based on CMIP5 climate models // *Geosciences*, 2019, vol. 9, No. 5, p. 232.

Nelson F.E., Outcalt S.I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost // *Arct. Alp. Res.*, 1987, vol. 19, No. 3, p. 279–288.

Nyland K.E., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A. et al. Long-term circumpolar active layer monitoring (CALM) program observations in Northern Alaskan tundra // *Polar Geography*, 2021, vol. 44, No. 3, p. 167–185.

Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskiy D.A. et al. Localized vegetation, soil moisture, and ice content offset permafrost degradation under climate warming // *Geosciences*, 2023, vol. 13, No. 5, p. 1–13.

O'Neill H.B., Smith S.L., Burn C.R. et al. Widespread permafrost degradation and thaw subsidence in Northwest Canada // *J. Geophys. Res., Earth Surface*, 2023, vol. 128, No. 8, p. 1–16.

Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // *Commun. Earth Environ.*, 2022, No. 3, Art. 168.

Rouyet L., Lauknes T.R., Christiansen H.H. et al. Seasonal dynamics of a permafrost landscape, Adventdalen, Svalbard, investigated by InSAR // *Remote Sens. Environ.*, 2019, vol. 231, Art. 111236.

Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Little J.D., Nelson F.E. Isotropic thaw subsidence in undisturbed permafrost landscapes // *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, No. 24, p. 6356–6361.

Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science // *Permafr. Periglac. Process.*, 2005, vol. 16, No. 1, p. 5–17.

Streletskiy D.A., Maslakov A., Grosse G. et al. Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere—review and perspectives // *Environ. Res. Lett.*, 2025, vol. 20, No. 1, p. 1–16.

Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G. et al. Permafrost degradation in the western Russian Arctic // *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 154, No. 4, 045001.

Zamolodchikov D.G., Kotov A.N., Karelin D.V., Razzhivin V.Yu. Active-layer monitoring in Northeast Russia: Spatial, seasonal, and interannual variability // *Polar Geography*, 2004, vol. 28, No. 4, p. 286–307.

Zhang J., Liu L., Hu Y. Global Positioning System interferometric reflectometry (GPS-IR) measurements of ground surface elevation changes in permafrost areas in northern Canada // *The Cryosphere*, 2020, vol. 14, No. 6, p. 1875–1888.

Zhang Z., Lin H., Wang M. et al. A review of satellite synthetic aperture radar interferometry applications in permafrost regions: Current status, challenges, and trends // *IEEE Geosci. Remote Sens. Magazine*, 2022, vol. 10, No. 3, p. 93–114.

Zwieback S., Liu L., Rouyet L. et al. Advances in InSAR analysis of permafrost terrain // *Permafr. Periglac. Process.*, 2024, vol. 35, No. 4, p. 544–556.

URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (дата обращения: 06.03.2025).

References

Baranov I.Ya., Baulin V.V. The influence of long-term freezing on the formation of geomorphological levels. *Merzlotnyye issledovaniya* [Permafrost studies], 1964, iss. IV, p. 285–291 (in Russian).

Kanevsky M.Z. Regularities of formation of cryogenic structure of Quaternary deposits of northern Yakutia: Abstract of Cand. Geol.-Min. Sci. [Abstract of the dissertation of the candidate of geological and mineralogical sciences]. Moscow, 2004, 23 p. (in Russian).

Konishchev V.N. Intra-landscape response of permafrost conditions to modern climate changes. *Nauchnyi almanakh* [Scientific almanac], 2003, No. 1, p. 129–144 (in Russian).

Konishchev V.N. Permafrost response to global warming. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography], 2009, No. 4, p. 10–20 (in Russian).

Mazhitova G.G., Kaverin D.A. Thaw depth dynamics and soil surface subsidence at a Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) site, the European North of Russia. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2007, vol. XI, No. 4, p. 20–30 (in Russian).

Maslakov A.A., Zamolodchikov D.G., Zelensky G.M. Evolution of microrelief at the CALM R-27 “Lavrentia” site (Eastern Chukotka) against the background of modern climate change. In: *Rel'yef i chetvertichnyye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii* [Relief and Quaternary formations of the Arctic, Subarctic and North-West of Russia], 2024, No. 11, p. 561–570 (in Russian).

- Maslakov A.A., Komova N.N. Degradation of ice deposits of the coastal plains of Eastern Chukotka under modern climatic conditions. In: *Rel'yef i chetvertichnyye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii* [Relief and Quaternary formations of the Arctic, Subarctic and North-West of Russia], 2019, No. 6, p. 113–117 (in Russian).
- Romanovsky N.N. Towards the theory of thermokarst. *Vestnik MGU. Ser. 4. Geologiya* [Bulletin of Moscow State University. Ser. 4. Geology], 1977, No. 1, p. 65–71 (in Russian).
- Romanovsky N.N. *Osnovy kriogeneza litosfery* [Fundamentals of cryogenesis of the lithosphere]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1993, 36 p. (in Russian).
- Svod pravil SP 25.13330.2020. *Osnovaniya i fundamenty na vechnomorzlykh gruntakh (aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.04-88)* [Foundations and bases on permafrost soils (updated version of SNiP 2.02.04-88)]. Moscow, Gosstroy of Russia, 2020, 135 p. (in Russian).
- Shur Yu.L. *Verkhniy gorizont merzlukh porod i termokarst* [Upper horizon of frozen rocks and thermokarst]. Novosibirsk, Nauka, 1988, 213 p. (in Russian).
- Bartsch A., Leibman M., Strozzi T. et al. Seasonal progression of ground displacement identified with satellite radar interferometry and the impact of unusually warm conditions on permafrost at the Yamal Peninsula in 2016. *Remote Sens.*, 2019, vol. 16, No. 11, p. 1–25.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J. et al. Permafrost is warming at global scale. *Nature Commun.*, 2019, vol. 10, No. 1, p. 1–11.
- Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: Research designs and initial results. *Polar Geography*, 2000, vol. 24, No. 3, p. 165–258.
- Chen J., Wu Y., O'Connor M. et al. Active layer freeze-thaw and water storage dynamics in permafrost environments inferred from InSAR. *Remote Sens. Environ.*, 2020, No. 248, p. 1–12.
- Grebenets V.I., Tolmanov V.A., Streletskiy D.A. Active layer dynamics near Norilsk, Taimyr peninsula, Russia. *Geography, Environment, Sustainability*, 2021, vol. 14, No. 4, p. 55–66.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S), Climate Data Store (CDS), 2023 (accessed: 12.11.2024).
- Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D. et al. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North. *Polar Geography*, 2021, vol. 44, No. 3, p. 203–216.
- Lupachev A.V., Gubin S.V. Soil-cryogenic complex: The evidence of Late Pleistocene–Holocene coevolution of permafrost and cryogenic soils. *Permafr. Periglac. Process.*, 2023, vol. 3, No. 34, p. 317–330.
- Maslakov A.A., Egorov E.G., Zelensky G.M. et al. The transient layer of permafrost of the Eastern Chukotka coastal plains, NE Russia. In: *Proc. of the 26th Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions* (Moscow, Russia, 15–18 June 2021). Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2021, p. 1–8. – <https://www.poac.com/Proceedings/2021/POAC21-049.pdf>
- Maslakov A.A., Nyland K.E., Komova N.N. et al. Community ice cellars in eastern Chukotka: Climatic and anthropogenic influences on structural stability. *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, No. 3, p. 49–56.
- Maslakov A., Shabanova N., Zamolodchikov D. et al. Permafrost degradation within Eastern Chukotka CALM sites in the 21st century based on CMIP5 climate models. *Geosciences*, 2019, vol. 9, No. 5, p. 232.
- Nelson F.E., Outcalt S.I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost. *Arct. Alp. Res.*, 1987, vol. 19, No. 3, p. 279–288.
- Nyland K.E., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A. et al. Long-term Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program observations in Northern Alaskan tundra. *Polar Geography*, 2021, vol. 44, No. 3, p. 167–185.
- Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskiy D.A. et al. Localized vegetation, soil moisture, and ice content offset permafrost degradation under climate warming. *Geosciences*, 2023, vol. 13, No. 5, p. 1–13.
- O'Neill H.B., Smith S.L., Burn C.R. et al. Widespread permafrost degradation and thaw subsidence in Northwest Canada. *J. Geophys. Res.*, 2023, vol. 128, No. 8, p. 1–16.
- Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth Environ.*, 2022, No. 3, Art. 168.
- Rouyet L., Lauknes T.R., Christiansen H.H. et al. Seasonal dynamics of a permafrost landscape, Adventdalen, Svalbard, investigated by InSAR. *Remote Sens. Environ.*, 2019, vol. 231, Art. 111236.
- Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Little J.D., Nelson F.E. Isotropic thaw subsidence in undisturbed permafrost landscapes. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, No. 24, p. 6356–6361.
- Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science. *Permafr. Periglac. Process.*, 2005, vol. 16, No. 1, p. 5–17.
- Streletskiy D.A., Maslakov A., Grosse G. et al. Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere-review and perspectives. *Environ. Res. Lett.*, 2025, vol. 20, No. 1, p. 1–16.
- Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G. et al. Permafrost degradation in the western Russian Arctic. *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 154, No. 4, 045001.
- Zamolodchikov D.G., Kotov A.N., Karelin D.V., Razzhivin V.Yu. Active-layer monitoring in Northeast Russia: Spatial, seasonal, and interannual variability. *Polar Geography*, 2004, vol. 28, No. 4, p. 286–307.
- Zhang J., Liu L., Hu Y. Global Positioning System interferometric reflectometry (GPS-IR) measurements of ground surface elevation changes in permafrost areas in northern Canada. *The Cryosphere*, 2020, vol. 14, No. 6, p. 1875–1888.
- Zhang Z., Lin H., Wang M. et al. A review of satellite synthetic aperture radar interferometry applications in permafrost regions: Current status, challenges, and trends. *IEEE Geosci. Remote Sens. Magazine*, 2022, vol. 10, No. 3, p. 93–114.
- Zwieback S., Liu L., Rouyet L. et al. Advances in InSAR analysis of permafrost terrain. *Permafr. Periglac. Process.*, 2024, vol. 35, No. 4, p. 544–556.
- URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (last visited: 06.03.2025).

*Поступила в редакцию 5 июня 2024 г.,
после доработки – 13 мая 2025 г.,
принята к публикации 22 августа 2025 г.*

СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ЛЬДА

УДК 624.131.37; 666.321; 53.083.9

DOI: 10.15372/KZ20250502

EDN: YRZEUA

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ
ЗАМОРАЖИВАНИЯ НА ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
ТОНКОДИСПЕРСНОГО ГРУНТАВ.С. Колунин^{1,2,*}, З.А. Ишкова¹¹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия² Тюменский индустриальный университет, кафедра криологии Земли,
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

*Автор для контакта; e-mail: askold@ikz.ru

Представлены результаты исследований влияния начального режима замораживания тонкодисперсного модельного грунта (каолинитовой глины в полностью водонасыщенном состоянии с влажностью в интервале 0.43–0.51) и циклов нагрева–охлаждения на его фильтрационные свойства, когда в качестве фильтрата используется вода. В ходе экспериментов было показано, что фильтрационная способность каолинитовой глины зависит не только от температуры мерзлого грунта, но и от условий замораживания. Приведены графики зависимости коэффициента фильтрации мерзлого грунта от температуры в диапазоне –0.05...–0.3 °С, полученные при различных режимах замораживания грунта, которые демонстрируют существенное влияние условий замораживания на фильтрационные свойства мерзлого грунта. Экспериментальные исследования в этой области имеют важное значение для прогнозирования поведения мерзлых тонкодисперсных грунтов вблизи температуры начала замерзания, что особенно актуально в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: мерзлый грунт, циклы нагревания–охлаждения, фильтрация, коэффициент фильтрации.

Ссылка для цитирования: Колунин В.С., Ишкова З.А. Экспериментальные исследования влияния условий замораживания на фильтрационные свойства тонкодисперсного грунта // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 5, с. 20–26. DOI: 10.15372/KZ20250502. EDN: YRZEUA.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT
OF FREEZING TEMPERATURE REGIME ON FILTRATION PROPERTIES
OF FINELY DISPERSED MODEL SOILV.S. Kolunin^{1,2,*}, Z.A. Ishkova¹¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia² Tyumen State Oil-and-Gas University,
Volodarskogo St. 38, Tyumen, 625000 Russia

*Corresponding author; e-mail: askold@ikz.ru

The results of experimental studies of the influence of the initial freezing conditions and heating-cooling cycles of a finely dispersed model soil (kaolinite clay in a fully water-saturated state with the moisture content of 0.43–0.51) on its water filtration properties in the frozen state are presented. The filtration capacity of frozen kaolinite clay depends not only on its temperature but also on the freezing conditions. Graphs of the water permeability coefficient of the frozen soil versus temperature in the range of –0.05...–0.3 °C have been obtained for various soil freezing conditions. These graphs demonstrate the significant influence of freezing conditions on the filtration properties of frozen soil. Experimental research in this area is important for predicting the behavior of frozen heavy-textured soils near the initial freezing temperature, which is especially relevant in a changing climate.

Keywords: frozen ground, freeze-thaw cycles, filtration, water permeability coefficient.

ВВЕДЕНИЕ

Мерзлые грунты вблизи температуры окончания оттаивания обладают широким спектром массообменных свойств: влагопроводность, диффузия, фильтрация, электропроводность и др. [Ершов, 1979, 1986; Чеведев, 2004].

Экспериментальное изучение фильтрационных свойств мерзлого грунта предполагает учет ряда факторов. Установлено влияние гранулометрического состава и влажности грунта, а также его температуры на величину коэффициента фильтрации мерзлого грунта [Williams, Burt, 1974; Horiguchi, Miller, 1983; Black, Miller, 1990; Watanabe, Osada, 2016].

По способу измерения коэффициента фильтрации мерзлых пород экспериментальные методы можно разделить на два класса: стационарные и нестационарные.

В *стационарных методах* температура мерзлого грунта фиксирована, скорость потока жидкости через него не меняется со временем. Это удастся реализовать при помощи использования микропористых мембран, ограничивающих образец грунта и препятствующих замерзанию переохлажденной воды в подводящих каналах [Williams, Burt, 1974; Horiguchi, Miller, 1980, 1983; Andersland et al., 1996], либо прокачиванием через мерзлый грунт не воды, а жидкости с температурой замерзания ниже нуля [Andersland et al., 1996; Zhang Hu et al., 2016].

В *нестационарных методах* скорость потока жидкости через образец меняется с течением времени. Реализованы два следующих подхода измерения коэффициента фильтрации нестационарными методами:

- при одностороннем таянии мерзлого грунта, когда температура образца переменна в пространстве и времени. При этом уменьшается толщина мерзлого слоя грунта с течением времени [Watanabe, Osada, 2016, 2017];

- при фиксированной отрицательной температуре окружающей среды с применением водного раствора поваренной соли в качестве фильтрующей жидкости [Tokoro, Ishikawa, 2020].

Стационарные методы обладают тем преимуществом, что при изучении фильтрационных свойств мерзлого грунта температура внутри образца постоянна и равна температуре окружающей среды. Поэтому после проведения эксперимента удастся построить график зависимости коэффициента фильтрации мерзлого грунта от температуры. В частности, установлено, что проницаемость мерзлого грунта при данной температуре различна в режимах охлаждения и нагревания, а график зависимости коэффициента фильтрации от температуры напоминает гистерезисную петлю [Horiguchi, Miller, 1983]. Таким образом,

коэффициент фильтрации мерзлого грунта при данной температуре зависит от температурного режима, предшествующего измерению, и, по-видимому, от условий замораживания грунта. В цитированных выше работах грунт замораживался при фиксированной температуре окружающей среды, при этом температура менялась в достаточно широком диапазоне от -0.2 до -29 °C.

В физически обоснованных математических моделях морозного пучения [O'Neill, Miller, 1985] в промерзающем грунте выделяются три зоны: мерзлый грунт (непроницаемый для воды), промерзающая зона (мерзлый грунт при температуре вблизи температуры начала замерзания) и талый грунт. Образование макрошлывов льда происходит на контакте мерзлый грунт – промерзающая зона. Скорость и время роста ледяного шлыва прямо зависят от коэффициента фильтрации грунта промерзающей зоны. Поэтому на этапе измерения коэффициента фильтрации мерзлого грунта вблизи температуры начала замерзания важно найти такие режимы замораживания грунта, которые давали бы максимальный разброс величины коэффициента фильтрации при данной температуре.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию начального режима замораживания грунта, а также циклов нагрева–охлаждения и охлаждения–нагрева на его фильтрационные свойства в диапазоне температур от -0.05 до -0.3 °C.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве объекта исследования используется каолинистая глина 1, которая находится между двумя пластинами пористой керамики 3 (рис. 1). Образец грунта и пластины разделяют микропористые мембраны 2, используемые в качестве фазового барьера и препятствующие проникновению льда из мерзлого грунта в керамику и емкости с дистиллированной водой 4. Для проведения исследований были изготовлены две идентичные экспериментальные ячейки.

Экспериментальная ячейка с образцом, оборудованная термодатчиками, помещается в центр стеклянной банки объемом 0.5 дм^3 , погруженной в термостатируемую жидкость, температура которой регулируется с шагом 0.01 °C. Теплообмен между ячейкой и окружающей средой осуществляется через слой теплоизоляции (воздух и пенопласт).

Термодатчики прикреплены к корпусу экспериментальной ячейки: на уровне образца грунта, на основании и в верхней части ячейки. В качестве термодатчиков применяются различные медь-константановые термодатчики, опорные спай которых помещены в термос с водой и измельченным льдом. В свою очередь, термос находится в холо-

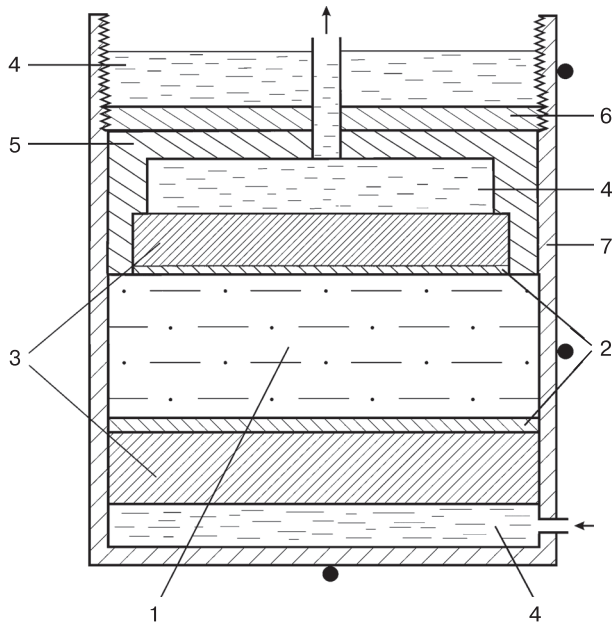


Рис. 1. Схема экспериментальной ячейки.

1 – грунт; 2 – мелкопористые мембраны; 3 – пористая керамика; 4 – дистиллированная вода; 5 – штамп; 6 – стопорный винт; 7 – корпус ячейки; черные точки – датчики термодатчиков.

дильнике, в котором поддерживается температура, близкая к 0°C . Погрешность измерения температуры порядка 0.005°C .

Поток воды через образец создается разностью гидравлических напоров на входе и на выходе экспериментальной ячейки, равной 115 см. Объем жидкости, прошедшей через грунт за определенное время, измеряется на входе и выходе ячейки по смещению мениска в капиллярах с точностью порядка 0.003 мл. Скорость фильтрации определяется как среднее по результатам измерения входящего и выходящего потоков воды. Величина коэффициента фильтрации находится из общеизвестного закона Дарси с абсолютной погрешностью менее $4 \cdot 10^{-13}$ м/с.

Единичное измерение коэффициента фильтрации при фиксированной температуре занимает более 3 суток, в течение которых остается неизменной скорость фильтрации воды через мерзлый грунт. Температура образца изменяется дискретно с шагом 0.08°C . При смене температуры термостата стабилизация потока воды происходит в течение 3–5 сут.

Эксперимент включает следующие основные этапы:

- приготовление водонасыщенной каолиновой глины с влажностью 0.57;
- заполнение грунтом центральной части экспериментальной ячейки (см. рис. 1), которая имеет форму цилиндра диаметром 30 мм;

- последовательное компрессионное уплотнение грунта штампом 5 до нагрузки 1 атм и фиксация его стопорным винтом 6 (см. рис. 1). После уплотнения высота грунта составляет 8–10 мм;

- помещение экспериментальной ячейки с тремя термодатчиками в жидкостный термостат при комнатной температуре;

- охлаждение экспериментальной ячейки до заданной отрицательной температуры. В первой и третьей сериях она равна $-(0.15 \pm 0.02)^{\circ}\text{C}$, а во второй серии составляет $-(0.23 \pm 0.02)^{\circ}\text{C}$. При этом вода в ячейке находится в переохлажденном состоянии;

- определение величины коэффициента фильтрации талого (охлажденного) образца каолиновой глины (в течение суток);

- внесение затравки льда в переохлажденную воду на поверхности штампа (см. рис. 1). После замерзания воды на поверхности штампа лед через зазор между стенкой ячейки и штампом проникает в грунт. Начало замерзания воды в глине фиксируется по показаниям термодатчиков: резкое увеличение температуры грунта и затем плавное ее понижение до постоянного значения. Температура начала замерзания равна примерно -0.03°C ;

- замораживание образца при различных температурных режимах (три серии экспериментов);

- определение величины коэффициента фильтрации мерзлого образца в стационарных условиях (при фиксированном перепаде давления воды и неизменной во времени скорости потока воды) и различных температурах;

- определение влажности грунта по окончании эксперимента.

Всего проведено три серии экспериментов, различающихся температурным режимом замораживания талого грунта.

В 1-й серии замораживание производилось при фиксированной температуре окружающей среды $-(0.14 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$, за исключением эксперимента E2_1, в котором после начала кристаллизации воды в образце температура термостата была увеличена до -0.04°C (примерно равна температуре начала замерзания воды в грунте). Далее для описания результатов экспериментов применяется следующее обозначение: Ei_j , где i – номер термостата, на котором проведен эксперимент ($i = 1, 2$); j – номер эксперимента.

Во 2-й серии замораживание происходило при фиксированной температуре окружающей среды $-(0.23 \pm 0.02)^{\circ}\text{C}$.

В 3-й серии в течение суток замораживание образца осуществлялось при температуре окружающей среды $-(0.15 \pm 0.02)^{\circ}\text{C}$. В конце этого периода времени температура ячейки становилась практически равной температуре термостатируемой жидкости. Затем температура жидкости в термостате повышалась и устанавливалась равной $-(0.05 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$.

Время выхода системы на стационарный режим фильтрации после внесения затравки льда составляет от 2 до 10 сут и зависит от температуры жидкости в термостате и количества замерзающей воды (табл. 1).

В некоторых экспериментах (серия 1, опыты E2_1, E2_3, E2_4, E2_5; серия 3, опыт E1_6) после замерзания воды на поверхности штампа грунт оставался в талом состоянии. Чтобы вызвать кристаллизацию воды в образце, температура термостата понижалась на -0.24°C . Как правило, при показаниях датчиков -0.22°C начиналась кристаллизация грунтовой воды, что отражалось на термограмме повышением температуры. Спустя 20 мин после этого температура термостата устанавливалась равной первоначальному значению.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем разделе представлены следующие результаты: влияние режима замораживания на коэффициент фильтрации при данной температуре (сравнение коэффициентов фильтрации серий 1–3 при средних температурах -0.15 и -0.22°C); влияние циклов охлаждения–нагрева (1-я серия) и нагрева–охлаждения (2-я серия) на величину коэффициента фильтрации (K_f) при данной температуре (T).

Результаты измерений 1-й серии экспериментов приведены на рис. 2, а, б; 2-й серии – на рис. 2, в, г; 3-й серии – на рис. 2, д. Как видно на рис. 2, коэффициент фильтрации талого грунта лежит в достаточно узком диапазоне $4 \cdot 10^{-10}$ – $8 \cdot 10^{-10}$ м/с.

Большинство измерений коэффициента фильтрации мерзлого образца грунта в 1-й и 2-й сериях произведены вблизи двух значений температуры образца -0.14 и -0.23°C .

Средние значения коэффициента фильтрации мерзлой каолининовой глины вблизи температуры -0.14°C приведены в табл. 2. Результаты измерений показывают, что величина коэффициента фильтрации мерзлого грунта при температуре -0.14°C зависит от режима замораживания (см. табл. 2). Согласно результатам 1-й и 2-й серий, фильтрационная способность образца уменьшается с понижением температуры, при которой происходит первоначальное замораживание грунта. Однако в экспериментах 3-й серии наблюдается обратная картина – мерзлый грунт, замороженный в два этапа, начиная с температуры -0.14°C и заканчивая $-(0.06 \pm 0.02)^{\circ}\text{C}$, имел на порядок меньший коэффициент фильтрации по сравнению с грунтом, замороженным в 1-й и 2-й сериях.

Средние значения коэффициента фильтрации мерзлой каолининовой глины при температуре $-(0.23 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$ приведены в табл. 3.

Таблица 1. **Время выхода системы на стационарный режим фильтрации после внесения затравки в 1-й и 2-й сериях экспериментов**

Номер эксперимента	Время от внесения затравки льда до начала измерения, сут	Установившаяся температура образца, $^{\circ}\text{C}$
<i>1-й термостат</i>		
E1_1	9	-0.17
E1_2	2	-0.15
E1_3	4	-0.15
E1_4	7	-0.15
E1_5	5	-0.16
E1_6	2	-0.23
E1_7	2	-0.18
E1_10	7	-0.24
<i>2-й термостат</i>		
E2_1	10	-0.03
E2_2	3	-0.15
E2_3	4	-0.15
E2_4	6	-0.12
E2_5	7	-0.17
E2_6	9	-0.14
E2_7	2	-0.22
E2_12	4	-0.22

Величина коэффициента фильтрации при данной температуре после нагревания образца и последующего охлаждения до первоначальной температуры уменьшается незначительно (табл. 4, эксперименты 2-й серии). Начальная температура равна $-(0.23 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$, осуществляется нагревание до температуры $-(0.14 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$, охлаждение до $-(0.23 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$.

Это явление наблюдается также при обратном цикле в 1-й серии экспериментов, величина коэффициента при данной температуре после охлаждения образца и последующего нагревания до первоначальной температуры также уменьшается (табл. 5). В эксперименте E2_1 реализована следующая схема изменения температуры ($^{\circ}\text{C}$): $-0.03 \rightarrow -0.15 \rightarrow -0.03 \rightarrow -0.15$; в эксперименте E1_7: $-0.18 \rightarrow -0.22 \rightarrow -0.15 \rightarrow -0.23$.

Таким образом, коэффициент фильтрации мерзлого грунта при данной температуре уменьшается после цикла нагрева–охлаждения или охлаждения–нагрева.

В табл. 6 приведена величина весовой влажности грунта, определенная в конце эксперимента.

Анализ результатов экспериментов выявил несколько ключевых аспектов влияния температурного режима замораживания на фильтрационные свойства мерзлой каолининовой глины в области высоких отрицательных температур ($-0.03 \dots -0.2^{\circ}\text{C}$). Наблюдается существенная зависимость коэффициента фильтрации воды от условий замораживания. Это подтверждает гипотезу о

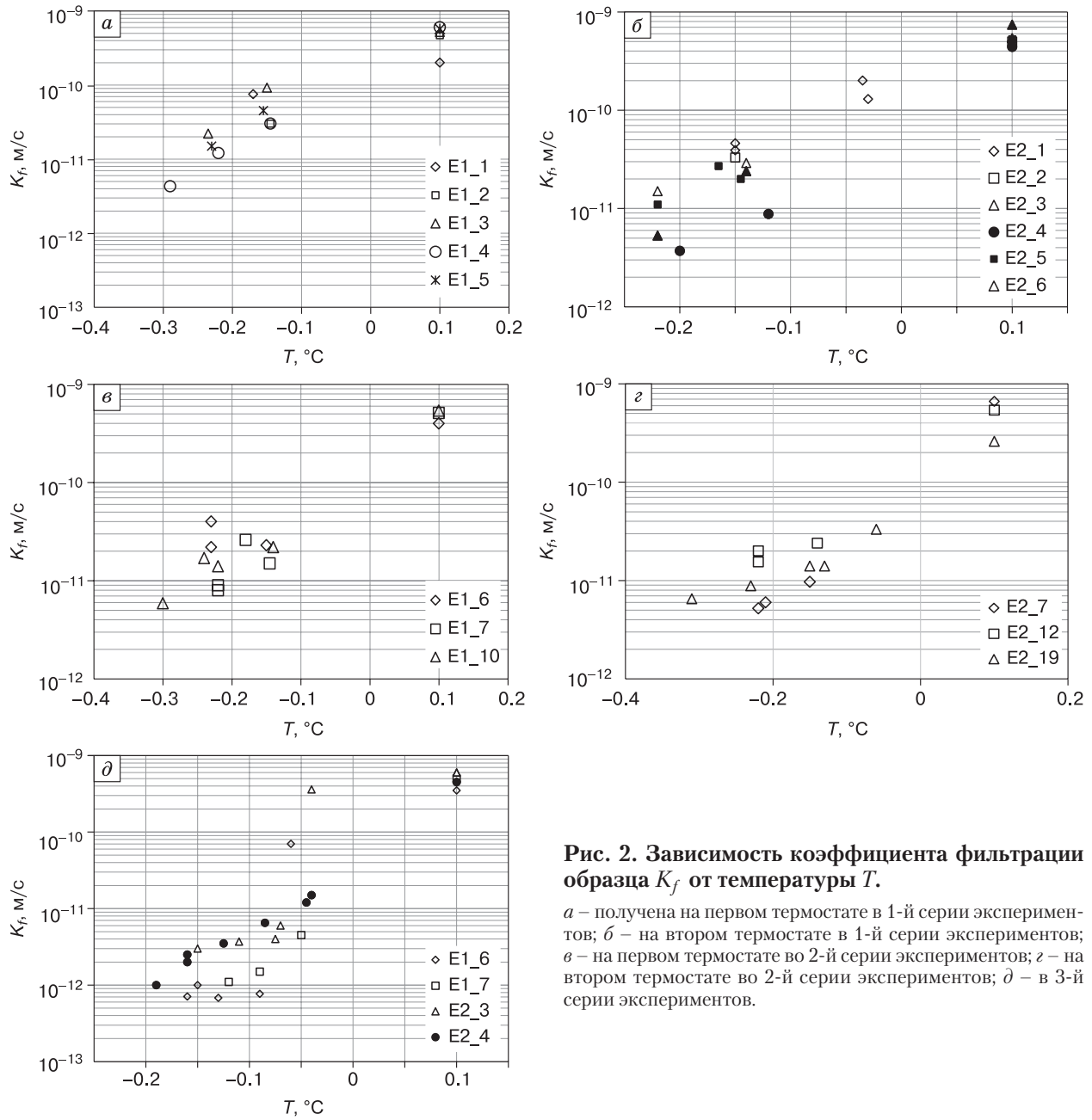


Рис. 2. Зависимость коэффициента фильтрации образца K_f от температуры T .

a – получена на первом термостате в 1-й серии экспериментов; *б* – на втором термостате в 1-й серии экспериментов; *в* – на первом термостате во 2-й серии экспериментов; *г* – на втором термостате во 2-й серии экспериментов; *д* – в 3-й серии экспериментов.

Таблица 2. Средние значения коэффициента фильтрации мерзлой глины при температуре $-(0.14 \pm 0.02)^\circ\text{C}$ (1–3-я серии экспериментов)

Температура в термостате при замораживании глины	Коэффициент фильтрации, м/с	
	1-я ячейка	2-я ячейка
1-я серия	$5.44 \cdot 10^{-11}$	$2.8 \cdot 10^{-11}$
2-я серия	$2.1 \cdot 10^{-11}$	$1.7 \cdot 10^{-11}$
3-я серия	$8.7 \cdot 10^{-13}$	$2.7 \cdot 10^{-12}$

Таблица 3. Средние значения коэффициента фильтрации мерзлой глины при температуре $-(0.23 \pm 0.01)^\circ\text{C}$ (1, 2-я серии экспериментов)

Температура в термостате при замораживании глины	Коэффициент фильтрации, м/с	
	1-я ячейка	2-я ячейка
1-я серия	$1.8 \cdot 10^{-11}$	$8.8 \cdot 10^{-12}$
2-я серия	$1.8 \cdot 10^{-11}$	$1.3 \cdot 10^{-11}$

Таблица 4. Влияние цикла нагрев–охлаждение на значение коэффициента фильтрации мерзлой глины (2-я серия экспериментов)

Измерение	Коэффициент фильтрации, м/с	
	1-я ячейка (два эксперимента)	2-я ячейка (два эксперимента)
Начальное	$1.3 \cdot 10^{-11}$	$1.3 \cdot 10^{-11}$
После нагрева и охлаждения	$1.1 \cdot 10^{-11}$	$1.03 \cdot 10^{-11}$

Таблица 5. Влияние цикла охлаждения–нагрев на значение коэффициента фильтрации мерзлой глины (1-я серия экспериментов)

Измерение	Коэффициент фильтрации, м/с	
	опыт E2_1	опыт E1_7
Начальное	$2 \cdot 10^{-10}$	$2.6 \cdot 10^{-11}$
После охлаждения и нагрева	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-11}$

том, что физические свойства грунтов могут изменяться не только в результате замораживания или оттаивания, но и под воздействием циклических изменений температуры, даже если не достигнут порог оттаивания, что характерно для высокотемпературных вечномерзлых грунтов. Полученные данные подчеркивают сложность переходных процессов в грунтах и необходимость учета предыстории их температурного режима при анализе и оценке динамики изменения их фильтрационных свойств с течением времени.

ВЫВОДЫ

В ходе серии экспериментов показано, что фильтрационные свойства мерзлого грунта зависят не только от температуры, но от предыстории теплового взаимодействия грунта с окружающей средой при достижении данной температуры.

Величина коэффициента фильтрации мерзлого образца каолининовой глины в области высоких отрицательных температур (около -0.15 °C) может изменяться в пределах порядка в зависимости от температурного режима выхода к данной температуре (см. табл. 2). Таким образом, режим замораживания оказывает заметное влияние на величину коэффициента фильтрации каолининовой глины, что, вероятно, обусловлено изменениями физических свойств мерзлого грунта, которые связаны с формированием и трансформацией внутри него ледяных включений.

Показано, что циклическое тепловое воздействие нагрева–охлаждения–нагрева на мерзлый грунт уменьшает его фильтрационную способность при данной температуре. Наиболее вероят-

Таблица 6. Влажность грунта (W) после проведения эксперимента

Номер эксперимента	W, г/г
<i>1-й термостат</i>	
E1_1	0.45
E1_2	0.44
E1_3	0.44
E1_4	0.49
E1_5	0.49
E1_6	0.47
E1_7	0.50
E1_10	0.46
<i>2-й термостат</i>	
E2_1	0.42
E2_2	0.43
E2_3	0.44
E2_4	0.43
E2_5	0.49
E2_6	0.51
E2_7	0.48
E2_12	0.48

ная причина этого – укрупнение шлиров льда и уплотнение скелета грунта в областях с массивной криогенной текстурой при таком тепловом воздействии в стадии охлаждения грунта. По-видимому, существует предел, к которому стремится коэффициент фильтрации при данной температуре при многократном повторении циклов нагрева–охлаждения и охлаждения–нагрева.

В связи с потеплением климата знание фильтрационных свойств мерзлых пород необходимо для предсказания скорости и величины осадки оснований зданий и сооружений, возведенных на вечномерзлых грунтах.

Литература

- Ершов Э.Д. Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. М., Изд-во Моск. ун-та, 1979, 214 с.
- Ершов Э.Д. Физико-химия и механика мерзлых пород. М., Изд-во Моск. ун-та, 1986, 333 с.
- Чеве́рев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов. М., Науч. мир, 2004, 234 с.
- Andersland O.B., Wiggert D.C., Davies S.H. Hydraulic conductivity of frozen granular soils // J. Environ. Eng., 1996, vol. 122, No. 3, p. 212–216.
- Black P.B., Miller R.D. Hydraulic conductivity and unfrozen water content of airfree frozen silt // Water Resour. Res., 1990, vol. 26, No. 2, p. 323–329.
- Horiguchi K., Miller R.D. Experimental studies with frozen soil in an “ice sandwich” permeameter // Cold Reg. Sci. Technol., 1980, vol. 3, No. 2–3, p. 177–183.
- Horiguchi K., Miller R.D. Hydraulic conductivity functions of frozen materials // Permafrost. Fourth Int. Conf. Proceedings. Washington, Nat. Acad. Press, 1983, vol. 1, p. 504–508.
- O’Neill K., Miller R.D. Exploration of a rigid ice model of frost heave // Water Resour. Res., 1985, vol. 21, No. 3, p. 281–296.

Tokoro T., Ishikawa T. Measurement for permeability of frozen soil by transient pulse method // *Transport. Soil Eng. Cold Reg.*, 2020, vol. 1, p. 71–78.

Watanabe K., Osada Y. Comparison of hydraulic conductivity in frozen saturated and unfrozen unsaturated soils // *Vadose Zone J.*, 2016, vol. 15, No. 5, p. 1–7.

Watanabe K., Osada Y. Simultaneous measurement of unfrozen water content and hydraulic conductivity of partially frozen soil near 0 °C // *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2017, vol. 142, p. 79–84.

Williams P.J., Burt T.P. Measurement of hydraulic conductivity of frozen soils // *Can. Geotech. J.*, 1974, vol. 11, No. 4, p. 647–650.

Zhang Hu, Zhang Jian-ming, Zhang Zhi-long, Chai Ming-tang. Measurement of hydraulic conductivity of Qinghai-Tibet Plateau silty clay under subfreezing temperatures // *Chin. J. Geotech. Eng.*, 2016, vol. 36, No. 6, p. 1030–1035.

References

Ershov E.D. *Vlagoperenos i kriogennyye tekstury v dispersnykh porodakh* [Moisture transfer and cryogenic textures in dispersed rocks]. Moscow, MGU, 1979, 214 p. (in Russian).

Ershov E.D. *Fiziko-himiya i mehanika merzlykh porod* [Physical chemistry and mechanics of frozen rocks]. Moscow, MGU, 1986, 336 p. (in Russian).

Cheverev V.G. *Priroda kriogennykh svoystv gruntov* [The nature of cryogenic properties of soils]. Moscow, Nauchnyi mir, 2004, 234 p. (in Russian).

Andersland O.B., Wiggert D.C., Davies S.H. Hydraulic conductivity of frozen granular soils. *J. Environ. Eng.*, 1996, vol. 122, No. 3, p. 212–216.

Black P.B., Miller R.D. Hydraulic conductivity and unfrozen water content of airfree frozen silt. *Water Resour. Res.*, 1990, vol. 26, No. 2, p. 323–329.

Horiguchi K., Miller R.D. Experimental studies with frozen soil in an “ice sandwich” permeameter. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 1980, vol. 3, No. 2–3, p. 177–183.

Horiguchi K., Miller R.D. Hydraulic conductivity functions of frozen materials. in: *Permafrost. Fourth Int. Conf. Proceedings*. Washington, Nat. Acad. Press, 1983, vol. 1, p. 504–508.

O'Neill K., Miller R.D. Exploration of a rigid ice model of frost heave. *Water Resour. Res.*, 1985, vol. 21, No. 3, p. 281–296.

Tokoro T., Ishikawa T. Measurement for permeability of frozen soil by transient pulse method. *Transport. Soil Eng. Cold Reg.*, 2020, vol. 1, p. 71–78.

Watanabe K., Osada Y. Comparison of hydraulic conductivity in frozen saturated and unfrozen unsaturated soils. *Vadose Zone J.*, 2016, vol. 15, No. 5, p. 1–7.

Watanabe K., Osada Y. Simultaneous measurement of unfrozen water content and hydraulic conductivity of partially frozen soil near 0 °C. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2017, vol. 142, p. 79–84.

Williams P.J., Burt T.P. Measurement of hydraulic conductivity of frozen soils. *Can. Geotech. J.*, 1974, vol. 11, No. 4, p. 647–650.

Zhang Hu, Zhang Jian-ming, Zhang Zhi-long, Chai Ming-tang. Measurement of hydraulic conductivity of Qinghai-Tibet Plateau silty clay under subfreezing temperatures. *Chin. J. Geotech. Eng.*, 2016, vol. 36, No. 6, p. 1030–1035.

*Поступила в редакцию 21 апреля 2022 г.,
после доработки – 25 февраля 2025 г.,
принята к публикации 23 июля 2025 г.*

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 556.53 + 551.345+551.242.1

DOI: 10.15372/KZ20250503

EDN: TSBQAY

ТЕКТОНОГЕННЫЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФЕНОМЕНЫ
В ТАЛИКЕ НИЗКОПОРЯДКОВОГО ВОДОТОКА

В.М. Михайлов

*Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция
Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 685000, Магадан, ул. Портовая, 16, Россия**E-mail: vmmikhailov@gmail.com*

Исследованы ландшафтно-гидрологические и гидрогеологические трансформации в долине II порядка, где сформированы водопоглощающие талики по двум линейным разломам и замыкающей нижний разлом изометричной депрессией. С использованием аэрокосмических материалов, натурных наблюдений и справочных данных обоснована гипотеза о тектонической обусловленности происходящих изменений. Как минимум до 1965 г. сток в долине ниже депрессии отсутствовал, максимальная интенсивность инфильтрации превышала $4 \text{ м}^3/\text{с}$. Поглощение поверхностных вод происходило главным образом в депрессии, там же откладывались поступающие с ними наносы. Впоследствии оба процесса здесь практически прекратились вследствие подъема дна впадины относительно тальвега ручья, и ниже по долине сформировалось полноценное русло. Инфильтрация при этом уменьшилась более чем на порядок, сохраняясь в основном в линейных разломах. Во впадине она происходит эпизодически на ее окраине, где образовался тектонический ров, вытянутый перпендикулярно руслу ручья. Сохраняющаяся тектоническая активность может обуславливать высокую интенсивность водопоглощения, вплоть до спонтанного сброса русловых вод. В зафиксированном случае сбросовый поток развивался в русле ручья, но в направлении, противоположном уклону его тальвега. Подобные явления не находят объяснений в рамках современных представлений о минимальных размерах подвижных тектонических блоков, что свидетельствует о необходимости их существенного расширения.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, талики, гидрогеологические процессы, эволюция водных объектов, мелкоблоковая тектоника, взаимосвязь поверхностных и подземных вод, ретроспективный анализ.

Ссылка для цитирования: Михайлов В.М. Тектоногенные гидрогеологические феномены в талике низкопорядкового водотока // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 5, с. 27–37. DOI: 10.15372/KZ20250503. EDN: TSBQAY.

TECTONOGENIC HYDROGEOLOGIC PHENOMENA IN THE TALIK OF A LOW-ORDER WATERCOURSE

V.M. Mikhailov

*North-Eastern Permafrost Research Station of the Melnikov Permafrost Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Portovaya St. 16, Magadan, 685000 Russia**E-mail: vmmikhailov@gmail.com*

Landscape-hydrological and hydrogeological changes have been studied in a second-order creek valley with water recharge taliks formed along two linear faults and an isometric depression closing the lower fault. A hypothesis about the tectonic origin of these changes is advanced based on the analysis of aerospace materials, *in situ* observations, and reference data. At least until 1965, there was no runoff in the valley downstream of the depression, and the maximum water infiltration rate exceeded $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Surface water infiltration, together with the deposition of sediment load, took place mainly in the depression. Subsequently, both processes virtually stopped there because of the rise of the bottom of the depression relative to the valley thalweg, and a fully developed channel was shaped downstream. Surface water infiltration has decreased by more than an order of magnitude and is observed now mainly in the area of linear faults. In the depression, it occurs sporadically at its margin, where a tectonic ditch is perpendicular to the creek channel. The ongoing tectonic activity may cause high intensity of water intake, up to the spontaneous discharge of the channel flow. In the observed case, such a discharge flow developed in the channel in the direction opposite to the slope of the creek thalweg. Such spontaneous phenomena cannot be explained within the framework of modern concepts about the minimum size of mobile tectonic blocks and attest to the need for their revision.

Keywords: permafrost, taliks, hydrogeologic processes, evolution of waterbodies, small-block tectonics, surface-groundwater relationship, retrospective analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Влияние блоково-разломной тектоники на поверхностные и подземные воды и их взаимосвязь проявляются в различных пространственных и временных масштабах. Сведения о минимальных значениях обоих показателей разрознены и не дают адекватного представления об их нижних пределах. Первым значительным шагом в изменении этого положения стала работа Д.А. Лилиенберга [1993]: “до проведения повторного нивелирования в горах мы, *честно говоря*, не представляли, что площадная дифференциация современных вертикальных движений может проявляться в блоках с поперечниками *всего* в несколько сотен метров...” (с. 89, курсив мой – В.М.).

В диссертации [Баранская, 2015] также говорится о дифференцированных движениях блоков размерами в сотни метров, причем автор называет их *макроблоками*, подразумевая, по-видимому, что это не предельно малые размеры.

В статье С.Д. Шведова [2010] отмечен еще более низкий предел тектонической дифференциации. Описывая рельеф грабен-долин, автор сообщает, что их борта “...образованы сбросами, преимущественно ступенчатыми; расстояние между плоскостями сместителей ... колеблется от первых десятков до сотен метров, а амплитуда смещений по ним – от нескольких метров до десятков метров” (с. 14). Меньшие значения, насколько мне известно, в литературе не приводились, если не считать вторичные, производные образования – например, западины на днищах тектонических рвов [Шведов, 2010].

В статье [Михайлов, 2021] на ряде примеров показано, что на режим поверхностных и подземных вод и их взаимодействие оказывают существенное влияние тектонические процессы, развивающиеся в малых пространственных и(или) временных масштабах. Все исследованные участки расположены на Северо-Востоке России, в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, и взаимосвязь водных объектов с подземными водами осуществляется исключительно через талики, преимущественно сквозные. Соответствующие процессы сопровождаются рядом специфических, ранее не описанных эффектов. В настоящей работе подробно рассмотрены близкие по содержанию и движущим механизмам гидрологические и гидрогеологические явления, определяющие эволюцию сквозного тектоногенного талика на Охотско-Колымском водоразделе.

Общеизвестно, что из коренных пород для развития взаимосвязи поверхностных и подземных вод наиболее благоприятны карстующиеся породы; в этом отношении они сильно превосходят все остальные. Такие породы отсутствуют как на исследуемом участке, так и на прилегающей территории; это обстоятельство подчеркивает ис-

ключительную роль тектонических факторов. При этом некоторые наблюдаемые явления не находят объяснения в рамках существующих представлений о минимальных размерах подвижных относительно друг друга блоков. Поэтому настоящая публикация, наряду с предыдущей, 2021 г., нацелена также на то, чтобы привлечь внимание исследователей к недостаточности наших знаний по рассматриваемому кругу проблем.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема расположения участка исследований и его дистанционные снимки представлены на рис. 1. Он находится на Колымском склоне водораздела, в пределах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Из коренных пород здесь преобладают эффузивы кислого и среднего состава. Известно [Уфимцев, 2002], что пояс ассоциирован с региональной системой разломов (проходящих в целом параллельно водоразделу), многие из которых в недавнее время были омоложены. Тектоническая активность выражается в комплексных дифференцированных блоковых движениях, в которых существенна также роль разломов, ориентированных перпендикулярно оси водораздела [Уфимцев, 2002]. Однако, судя по схеме, приведенной в работе [Калинина, Смирнов, 2017], а также на карте [Карта..., 2020], крупные активные разломы вблизи участка отсутствуют.

По характеру распространения многолетнемерзлых пород и режиму подземных вод А.И. Калябин в своей монографии [1960] выделил на Северо-Востоке пять районов. Суровость мерзлотных условий возрастает с удалением от морского побережья, от первого района к пятому. Согласно этому районированию, участок располагается во II мерзлотном районе, вблизи от его северной границы с III районом, и может быть отнесен к области сплошной криолитозоны. Интерполируя приведенные в этом источнике данные, заметим, что мощность многолетнемерзлых пород (ММП) в понижениях рельефа составляет 70–80 м, температура приблизительно от –1.5 до –3.0 °С. Деятельный слой имеет значительную величину, и надмерзлотные талики под водотоками распространяются на глубину до 5–10 м. Сквозные талики формируются под крупными непромерзающими реками и озерами, где режим подземных вод может носить застойный характер, а также на участках питания и выхода подмерзлотных вод. Приведенная в этой монографии обобщенная характеристика впоследствии не уточнялась и не корректировалась, конкретные сведения для близлежащей территории отсутствуют.

Обсуждаемый ниже фактический материал получен в результате собственных наблюдений автора (регулярные маршрутные обследования в те-

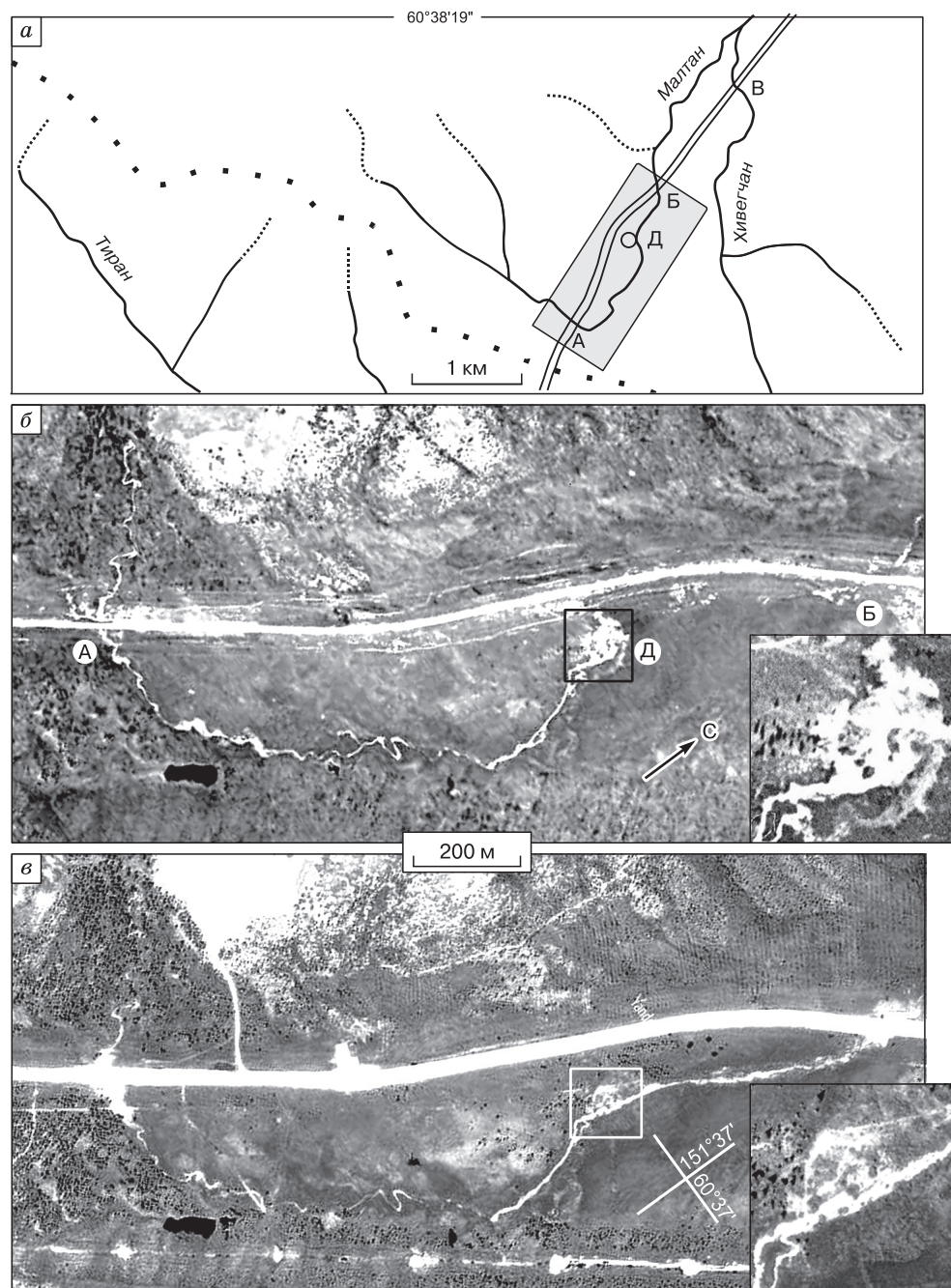


Рис. 1. Участок проведения исследований.

a – схема расположения (пунктиром обозначен водораздел, прямоугольником с заливкой выделен изучаемый участок, для которого приведены дистанционные изображения); *б* – аэрофотоснимок 1965 г.; *в* – спутниковый снимок сервиса “Яндекс карты” 2018 г. На рисунках *б* и *в* на врезках показан, в укрупненном масштабе, рассматриваемый ниже фрагмент ландшафта. Остальные обозначения и пояснения см. в тексте.

чение 10 лет (2013–2022) и инструментальные измерения, проведенные в самом начале этого периода), анализа справочных данных, картографических и аэрокосмических материалов и литературных источников; использованы также опросные сведения.

Инструментальные наблюдения включали вертикальные электроразведки (ВЭЗ), нивелирование характерных элементов рельефа и гидрометрические измерения с целью получения количественных оценок инфильтрации. Они были проведены на руч. Малтан и на близлежащем во-

дотоке руч. Хивегчан. Территориальная близость водосборов и сходные ландшафтные характеристики (подробнее ниже) позволяют использовать второй из них в качестве бассейна-аналога и, таким образом, оценить приток воды в русло Малтана, а соответственно, и потери из него стока на инфильтрацию при различных погодных условиях. Измерения осуществлялись по стандартной методике [Наставление..., 1972] детальным способом с увеличенным числом промерных вертикалей для получения максимальной точности результатов.

Гидрометрические работы проводились при помощи микровертушки ГМЦМ-1 в трех фазах гидрологического режима: 1) многоводный период, когда потери стока из долины Малтана на много превышали среднемесячные значения; 2) относительно маловодный период; 3) при промежуточных гидрологических условиях. Расход воды в руч. Хивегчан в первом случае составлял 21 % от средней максимальной величины (по ее зависимости от площади водосбора, выведенной в работе [Михайлов, 2014]), во втором был примерно равен среднеиюльскому значению (по сведениям справочника [Многолетние данные..., 1985] для водотоков с близкими водосборными площадями).

Методика качественной интерпретации результатов электроразведочных измерений подробно изложена в статье [Михайлов, Банцеекина, 2001].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ручей Малтан в верховьях, где он течет субпараллельно водоразделу (см. рис. 1, а), – типичный горный водоток со склонами умеренной крутизны (редко более 15°), покрытыми кедрово-стланниково-лиственничным редколесьем, выше сменяющимся щебнистыми осыпями. Отрезок от слияния двух потоков первого порядка до пересечения с автотрассой “Колыма” (точка А на рис. 1) далее называется верхним. Ниже по течению ручей круто поворачивает влево и протекает в широкой долине, через 1.5 км вновь пересекая автотрассу в точке Б, где его водосборная площадь составляет 7.76 км². На этом (“нижнем”) отрезке долина имеет пологие склоны и продольный уклон всего 0.013 (в 1.5 раза меньше по отношению к верхнему участку). По эмпирическим зависимостям, выведенным в работе [Михайлов, 2015], в горных сооружениях Северо-Востока России для долин равновеликих водотоков, вышедших из стадии глубинной эрозии, характерны как минимум вдвое большие уклоны.

На нижнем отрезке днище долины ручья выстелено щебнистыми элювиально-делювиальными отложениями и (ближе к тальвегу) гравийно-галечным аллювием с песчаным заполнителем, покрытыми маломощным слоем (до 0.4 м, местами, возможно, больше) илистого песка. Придорожные карьеры вскрыли коренные породы на

глубине около 2 м. Днище долины практически лишено древесной растительности, напоминая кустарниковую тундру (см. рис. 1, б, в). В его поперечном профиле отчетливые гипсометрические ступени отсутствуют; по большей части имеет место постепенное повышение отметок от бровок русла к подножиям склонов.

В 1.5 км вниз по течению от точки Б руч. Малтан сливается с руч. Хивегчан, который, следуя топонимике, является притоком Малтана, хотя его водосборная площадь больше в 2.5 раза (21.1 км² в точке В, см. рис. 1, а). Долина Хивегчана в ландшафтном отношении практически не отличается от вышеописанной. Ниже слияния уклон долины Малтана уменьшается незначительно, до 0.011. Далее на протяжении 25 км ручей принимает еще ряд притоков, три из которых в узлах слияния не уступают ему размерами, однако его долина сохраняет то же общее направление, что и на рис. 1, а (линия АБВ). Все эти черты складываются в картину наследования Малтаном долины более крупного водотока, обезглавленного путем вершинного перехвата. Такое предположение согласуется с общей конфигурацией речной сети (см. рис. 1, а) и представлениями об отступании Охотско-Колымского водораздела на его субширотном отрезке вглубь материка [Баранова, Бискэ, 1967; Шпикерман и др., 2016].

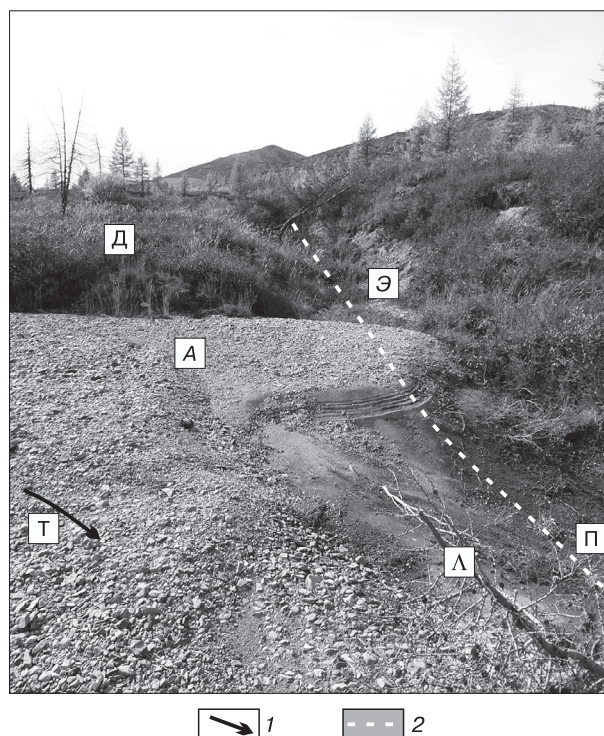
Самые неординарные эффекты современной тектоники, которые развиваются в течение очень короткого по геологическим меркам времени и определяют мерзлотно-гидрогеологическую обстановку в долине, сосредоточены вблизи русла Малтана. Наиболее примечательный элемент рельефа на рассматриваемом участке – неглубокая плоскодонная депрессия (точка Д на рис. 1), имеющая форму, близкую к окружности диаметром около 100 м (см. рис. 1, б). Со стороны оси долины депрессия граничит с руслом ручья, тальвег которого расположен примерно на 1 м ниже ее днища. На остальных участках периметра впадины ее днище лежит на 1.5–3.5 м ниже бровки склона, в зависимости от рельефа местности. Оно покрыто недавно отложенным гравийно-галечно-песчаным аллювием с разреженной травяно-кустарниковой растительностью – отсюда светлый тон соответствующих контуров на дистанционных снимках, резко контрастирующий с окружающим тундроподобным ландшафтом. Как следует из сравнения с космоснимком сервиса *n.maps.yandex.ru* (см. рис. 1, б, в), между 1965 и 2018 гг. как площадь, занятая контуром, так и контраст с окружающей местностью уменьшились; причины этого рассмотрены ниже.

Вдоль нижней по течению оконечности депрессии задернованный грунт с ее не затронутого общим опусканием обрамления сползает в свежесформированный ров, ориентированный поперек оси долины, в направлении восток–запад (рис. 1, 2).

Рис. 2. Ручей Малтан вблизи оконечности депрессии осенью 2013 г.

1 – направление течения при наличии стока; 2 – осевая линия тектонического рва. Обозначения: А – свежееотложенный аллювий; Д – днище депрессии; П – дно ближайшего к тальвегу провала; Т – тальвег ручья; Э – элювиально-делювиальные отложения; Л – погибшая лиственница.

Ров имеет ширину 1.5–2.5 м и местами засыпан грунтом, поступающим со склона, и аллювием, принесенным ручьем. Поэтому на местности ров выглядит как цепочка вытянутых ям (провалов), размеры которых убывают по мере удаления от русла. Их днища лежат ниже тальвега ручья, у самого глубокого провала – почти на 1 м (и на 4 м ниже близлежащей кромки депрессии). Провалы могут производить впечатление термокарстовых образований, но большую часть теплого сезона вода в них отсутствует, несмотря на приток вследствие сезонного протаивания мерзлых пород и эпизодической фильтрации из русла ручья. Это свидетельствует о постоянном оттоке воды в глубинные горизонты по трещинам в коренных породах и, следовательно, о тектоническом происхождении рва. Все провалы заполнились водой лишь после обильных дождей, выпавших в период с 10 по 22 августа 2013 г., но во время весеннего половодья того же года вода имела только в ближай-



ших двух провалах, непосредственно сообщавшихся с руслом Малтана из-за высокого уровня воды в ручье (рис. 3).

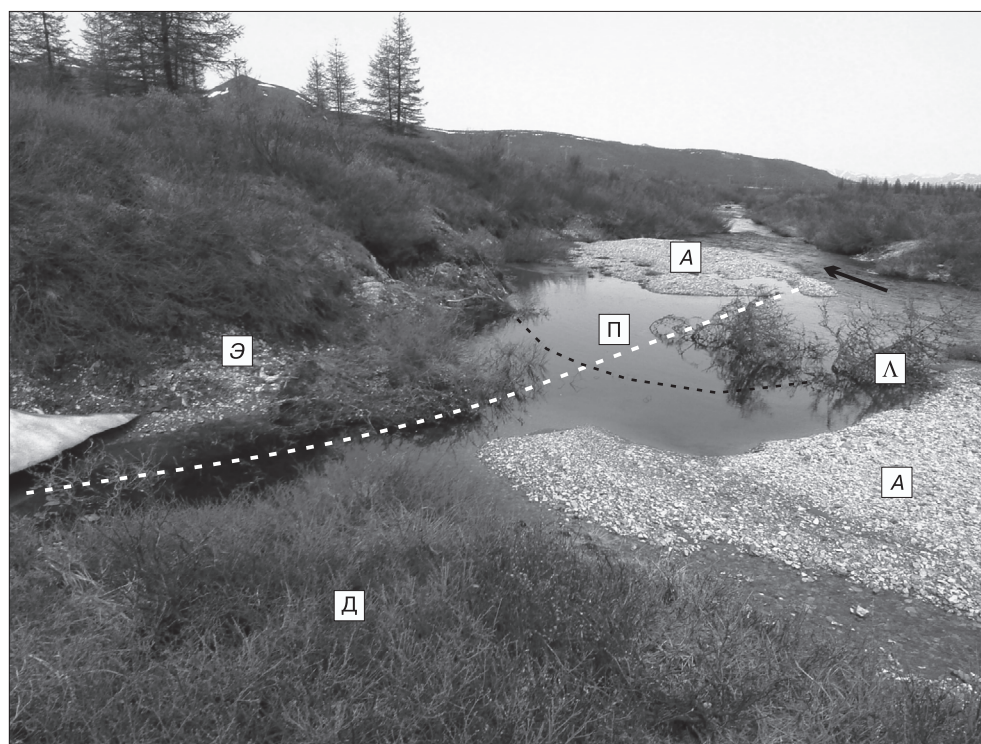


Рис. 3. Ручей Малтан вблизи оконечности депрессии весной 2013 г.

Черным пунктиром показаны очертания подводной части ствола погибшего дерева. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.

В руч. Малтан, ниже слияния его составляющих и до второго пересечения с автотрассой (точка Б), большую часть теплого сезона сток полностью отсутствует, хотя в обеих составляющих он продолжается вплоть до начала осеннего перемерзания. Поглощение стока прекращается ниже депрессии, по восточной – северо-восточной окраине которой проходит современное русло ручья. Далее вниз по долине при средних погодных условиях в углублениях русла все в больших количествах появляется вода, но лишь вблизи пересечения с автотрассой (или еще ниже) в них прослеживается слабое течение. Из сказанного следует, что русло на участке АДБ сформировано исключительно паводками и половодьями, а в межень на отрезке АД вся поступающая к тальвегу вода переходит в подземный сток.

Для того чтобы уточнить распределение талых и мерзлых пород, определяющих характер движения подземных вод, на участке АДБ были проведены вертикальные электроразведки при помощи автокомпенсатора АЭ-72. Их основной целью было удостовериться в преобладании здесь ММП. Методика измерений описана в многочисленных учебных пособиях (см., например, [Электроразведка, 2005]). Согласно результатам, полученным в двух пунктах ВЭЗ на удалении от русла ручья (т. е. заведомо вне зоны влияния предполагаемых щелеобразных таликов), здесь действительно распространены многолетнемерзлые грунты: полученные кривые принадлежат к типу А с монотонным возрастанием кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_k) по мере увеличения разностей питающих электродов. При зондировании в депрессии кривые ВЭЗ в верхней части геоэлектрического разреза соответствуют типу К: рост ρ_k с глубиной на малых разностях сменяется далее обратной тенденцией. Согласно результатам, полученным ранее [Михайлов, Банцеева, 2001], при близких гранулометрических и влажностных характеристиках грунтов это является признаком талого состояния. На предельно разное питающих электродов, близком к поперечнику депрессии, нижняя ветвь кривой меняет направление, придавая ей сходство с типом КН. В данном случае это, по-видимому, связано с боковым влиянием окружающих мерзлых пород, что характерно для зондирований на сквозных таликах [Методические рекомендации..., 1978].

Результаты электроразведочных работ свидетельствуют о том, что выше депрессии значительные объемы поступающей к тальвегу воды просачиваются вниз по трещинам, которые пронизывают всю толщу мерзлых коренных пород, формируя таким образом инфильтрационные талики, связанные с разломами юго-восточного и северо-восточного простирания (первый из них субпараллелен водоразделу). Возможно, эти щелеобразные

талики соединяются в месте пересечения разломов. На нижележащем участке инфильтрация поверхностных вод при тех же погодных условиях, которые обуславливают их полное поглощение этими таликами, по-видимому, не столь интенсивна либо вообще отсутствует.

Сравнение дистанционных снимков (см. рис. 1, б, в) позволяет восстановить в общих чертах динамику гидрологических и мерзлотно-гидрогеологических процессов за несколько истекших десятилетий.

На аэрофотоснимке 1965 г. (см. рис. 1, б) отчетливо видна основная особенность гидрографической обстановки на нижнем участке на момент съемки и за ряд предшествующих лет: полное отсутствие стока воды и наносов ниже депрессии. Очевидно, что даже в самые высокие паводки практически весь русловый расход поглощался выше по течению. При этом доля инфильтрации по щелевидным таликам была невелика (что следует из описанных ниже результатов гидрометрических работ), и значит, поглощение поверхностных вод происходило главным образом в депрессии.

Еще более важно то, что здесь же откладывался весь аллювий, принесенный с расположенных выше участков ручья, распределяясь приблизительно равномерно по всей ее площади. Этот процесс заслуживает подробного анализа. Если для интенсивной инфильтрации воды достаточно (помимо наличия сквозного талика) повышенная трещиноватость коренных пород с широким раскрытием трещин, то для долговременного “раз за разом” послойного накопления аллювия необходимо дополнительно, чтобы этот процесс компенсировался столь же непрерывным опусканием дна депрессии – так, чтобы его положение оставалось более низким по сравнению с тальвегом. При этом практически равномерное распределение наносов по всему небольшому по площади участку указывает на то, что днище погружалось не как единое целое, а путем чередования попеременных опусканий много меньших отдельных блоков, что обуславливало миграцию потока по всей площади впадины.

В последующий промежуток времени на исследуемом участке произошли кардинальные изменения, в результате которых на отрезке ДБ руч. Малтан сформировал хорошо разработанное русло. На исторических снимках сервиса *Google Earth*, несмотря на их низкое разрешение, можно видеть, что это событие произошло не позднее 1985 г. (за более ранний период снимки отсутствуют). В настоящее время ручей здесь протекает в широкой полосе галечно-гравийного аллювия, слагающего как откосы высотой до 1 м, так и отлогие прирусловые отмели. Здесь ручей имеет наиболее отчетливо выраженное русло вплоть до

слияния с руч. Хивегчан. Обилие на этом участке руслоформирующего аллювия позволяет предполагать, что ранее, до периода, характеризующегося снимком 1965 г., здесь также существовало русло.

Очевидно, что интенсивное руслоформирование развилось здесь из-за того, что прекратились взаимосвязанные процессы поглощения в депрессии поверхностного стока и отложения в ней поступавших в паводки наносов. В свою очередь, это было возможно только при условии как минимум прекращения погружения ее днища; на самом деле, как видно на рис. 2, произошла смена знака движения, так что тальвег ручья ныне расположен на ~1 м ниже днища депрессии. Изменившееся соотношение высотных отметок этих элементов рельефа исчерпывающе объясняет прекращение поступления в депрессию наносов, но не воды. Промерзание талика исключено ввиду малого промежутка истекшего времени. Ручей здесь на расстоянии почти 100 м протекает вплотную к восточному краю депрессии (см. рис. 1, в), что вполне благоприятно для поступления воды в талик по ранее отложенному аллювию и последующей фильтрации по трещинам в коренных породах. Но этого не происходит – во всяком случае, в сколько-нибудь значительных объемах. Единственным объяснением представляется резкое снижение водопроницаемости коренных пород в днище депрессии путем сильного сжатия составляющих его микроблоков. Альтернативное предположение, что поглощение стока прекратилось из-за кольтатации трещин в коренных породах, выглядит менее правдоподобным. Во-первых, не видно связи между реально наблюдаемым явлением (изменением относительного высотного положения днища депрессии) и этим гипотетическим процессом. Во-вторых, очевидно, что произошедшее некогда погружение участка коренных пород сопровождалось резким увеличением степени их трещиноватости (что и обусловило полное поглощение поверхностного стока). Логично считать, что обратный тектонический процесс вызвал противоположный эффект.

Оценить количественно масштаб изменений, происшедших в долине руч. Малтан, можно, сравнивая справочные данные, относящиеся к периоду полного поглощения твердого и жидкого стоков ниже точки Д, и результаты инструментальных измерений в современных условиях.

По эмпирической зависимости среднего максимального расхода воды ($\bar{Q}_{\max}$) от водосборной площади [Михайлов, 2014], эта характеристика в точке Д при отсутствии инфильтрации должна быть близка к $2.2 \text{ м}^3/\text{с}$. В данном случае она в действительности служит оценкой среднего наибольшего притока воды в русловую сеть с территории водосбора, замыкающегося на точку Д. Но и этот полученный результат существенно меньше мак-

симальной интенсивности поглощения поверхностного стока за длительный период до 1965 г. Дело в том, что величина $\bar{Q}_{\max}$ рассчитывается по среднесуточным значениям расходов за многолетний период. С учетом межгодовых вариаций максимального расхода талики в долине Малтана переводили в подземный сток весь максимально возможный суточный приток воды с площади 7.76 км^2 . По данным справочника [Многолетние данные..., 1985], у водотоков близких размеров эта величина превышает $\bar{Q}_{\max}$ более чем вдвое. Мало того, для интенсивного размыва речного русла, последствия которого сохраняются на многие годы, достаточно кратковременного (часы) экстремального паводка. Такие события вполне обычны на малых водотоках при выпадении ливневых осадков. Не исключено, что ниже по течению депрессии при этом происходил слабый сток воды, но он не сопровождался ни размывом грунта, ни отложением наносов. Во всяком случае, максимальная интенсивность инфильтрации выше точки Д в период, включающий 1965 г., измерялась более чем первыми кубометрами в секунду.

Согласно сведениям, приведенным для ближайших гидрометрических постов бассейна Верхней Колымы [Многолетние данные..., 1985], средний за год объем стока с исследуемого водосбора составляет $2 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. Максимальные значения за период наблюдений у ручьев с близкими водосборными площадями больше в среднем в 1.5 раза, т. е. величина наибольшего годового объема инфильтрации из русла Малтана за предшествующий период составляла около $3 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

Современные характеристики инфильтрации дают измерения расходов воды в ручьях Малтан и Хивегчан. Поскольку при одних и тех же погодных условиях влагообеспеченность обоих бассейнов (осадки минус испарение) практически одинакова, произведение модуля стока в Хивегчане (в точке В на рис. 1) на площадь водосбора в точке Б дает реалистичную оценку суммарного поступления воды в русловую сеть долины Малтана. Очевидно, что оно превышает расход, измеренный в этой точке, на величину инфильтрации. Результаты представлены в таблице.

В маловодный период, когда на всем исследуемом отрезке руч. Малтан сток отсутствовал (17 июля), результаты измерений дают величину инфильтрации, равную 124 л/с . После выпадения небольших, хотя и частых дождей (10 августа), в створе Б впервые с середины лета появился слабый сток (первые литры в секунду). Искомая характеристика при этом увеличилась до 273 л/с . В многоводный период, наступивший в результате продолжительных осадков (22 августа), она осталась практически неизменной (267 л/с). Небольшое уменьшение инфильтрации (близкое к погрешности измерений) при увеличении притока

Характеристики стока в 2013 г. в ручьях Хивегчан и Малтан и инфильтрация из долины Малтана

Дата	Погодные условия предшествующего периода	Хивегчан		Малтан		
		Расход воды, л/с	Модуль стока, л/(с·км ²)	Расход воды, л/с	Приток воды, л/с	Инфильтрация, л/с
17.07	Средние	326	15.5	0	124	124
10.08	Умеренные осадки	728	34.5	3.2	276	273
22.08	Продолжительные дожди	1400	66.4	264	531	267

воды может быть связано с тем, что ранее водопродводящие пути еще не были заполнены. По результатам измерений можно заключить, что предельная пропускная способность водопродводящих путей под руслом Малтана (т. е. в щелевидных таликах) составляет (265 ± 10) л/с. Судя по опросным сведениям, существенных изменений по сравнению с периодом до 1965 г. не произошло: как и в настоящее время, на пересечении с автотрассой (точка А) сток большую часть времени отсутствовал. Тем не менее вероятны небольшие подвижки по щелевидным разломам, не приводящие к заметным вариациям инфильтрации.

Следует отметить, что численные значения, приведенные в таблице, по существу являются оценками “снизу”, поскольку в долине руч. Хивегчан также не исключены потери руслового стока по щелевидным таликам.

Для оценки годовых объемов инфильтрации данные отсутствуют, но описанные результаты

позволяют утверждать, что эти величины также уменьшились многократно. Таким образом, в предшествующий период поглощение стока из долины Малтана обеспечивалось преимущественно не двумя взаимно перпендикулярными линейными разломами, а расположенным ниже по долине изометричным тектоническим нарушением.

Изложенные сведения в сумме свидетельствуют о том, что мелкоблоковая тектоническая активность в долине Малтана, достигавшая пика в некоторый промежуток времени, включавший 1965 г., впоследствии существенно ослабла. Вместе с тем она, во-первых, не прекратилась, во-вторых, может проявляться весьма своеобразно. Тектонический ров (см. рис. 2, 3) явно образовался незадолго до 2013 г., когда были сделаны соответствующие снимки. По визуальным наблюдениям, впоследствии он одновременно и углублялся, и заполнялся обломочным материалом. Погибшая лиственница (см. рис. 1, 2 и 4) служит своего рода

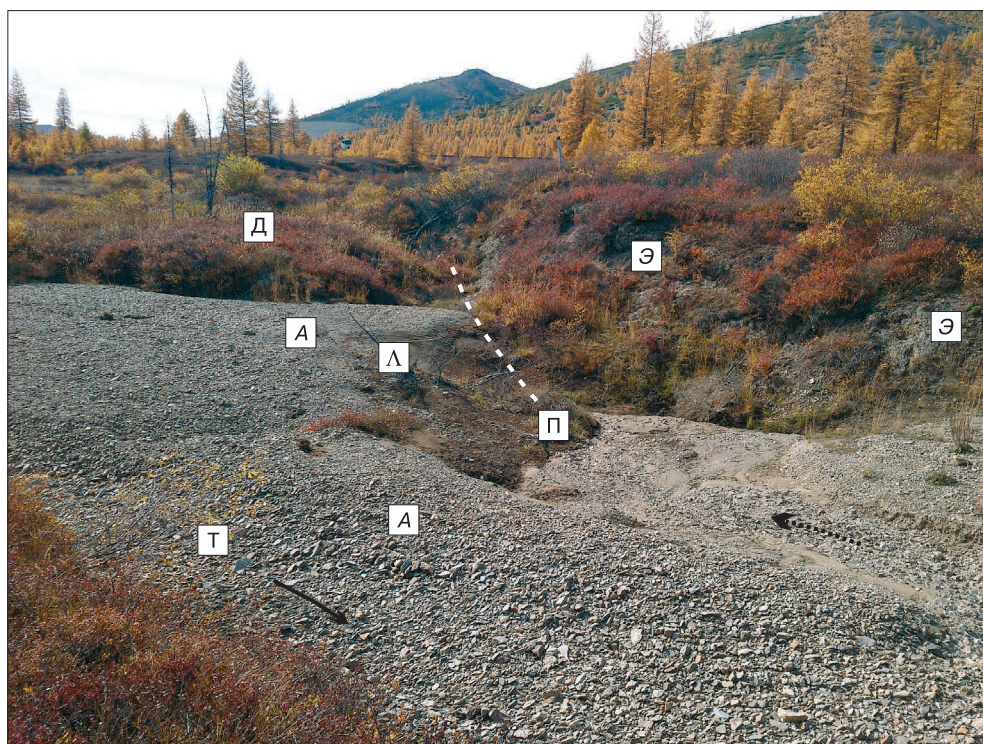


Рис. 4. Следы спонтанного поглощения воды тектоническим рвом (осень 2015 г.).

Пунктирная стрелка показывает направление сосредоточенного потока. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.

репером, приводящим к такому выводу. Весной 2013 г. (см. рис. 3) дугообразная форма ее ствола близко соответствовала профилю днища самого крупного провала. Далее подводная часть дерева погружалась, следуя за постепенно продолжавшимся тектоническим опусканием днища, и перекрывалась пригружавшими ствол наносами (см. рис. 2); в результате в 2015 г. на поверхности оставалась лишь верхушка лиственницы (см. рис. 4).

Данный процесс развивался весьма неравномерно. Одно из предельных проявлений этого – спонтанное усиление поглощения воды ближайшим к ручью провалом, последствия которого демонстрирует снимок (см. рис. 4). Залповое поступление воды в провал сопровождалось размывом аллювия, что привело, в частности, к формированию отчетливо выраженной промоины, концентрировавшей часть сбросового потока. При этом сток в ней явно развивался в обратном направлении по отношению к уклону тальвега. При вхождении в провал водокаменный сбросовой поток распластывался, перекрывая ранее накопленные мелкозернистые отложения и образуя своего рода конус выноса. Остатки этого потока поглощались узкой расщелиной, образовавшейся на примыкании тектонического рва к склону. В течение краткого периода разverzание подземной емкости прекратилось либо, скорее, сменилось сжатием.

Описанный феномен парадоксальным образом перекликается с описанным в статье [Михайлов, 2021] залповым выбросом подземных вод в русло ручья близкого размера¹. Оба явления, при их противоположной направленности, обладают двумя сходными чертами.

1. В обоих случаях непосредственной причиной служит резкое изменение емкости некоего подземного резервуара.

2. Кроме спонтанности, их сближает видимая физическая обособленность.

В обоих случаях в качестве первопричины “напрашивается” предположение о том, что они являются прямыми отголосками намного более масштабных тектонических событий. Но ответ на соответствующий запрос в геофизическую службу Магаданской области заставляет отвергнуть эту гипотезу. По образному выражению директора сейсмостанции С.В. Курткина, в указанных пунктах и в обозначенные периоды времени отклик на зарегистрированные тектонические события не мог превышать вибрации от проезжающего мимо автомобиля. Причинная обусловленность подобных явлений остается неясной.

Последнее маршрутное обследование депрессии в 2022 г. показало, что в ней продолжались слабые тектонические подвижки. Они были выражены в появлении двух вытянутых углублений, тогда как ранее подобные контрасты рельефа практически отсутствовали. Не исключено, что за промежуток времени после 2015 г. здесь могли развиваться процессы, сходные с описанными выше, но их следы не сохранились.

Остальная часть исследованного участка долины производит впечатление полного тектонического покоя в течение истекшего полувеккового периода. Но так было не всегда, о чем свидетельствует существование водоема размером 35×100 м и глубиной более 4 м (см. рис. 1, б, в; на дистанционных снимках он расположен в левой нижней части). Его термокарстовое происхождение исключено из-за значительной глубины. По результатам специальных исследований [Нестерева, 2012], глубины термокарстовых озер, даже при площади водного зеркала большей на два порядка, и даже в местностях с мощным слоем тонкодисперсных отложений, лежат в основном в пределах 1.1–1.3 м. Образование водоема вследствие вытаивания ледяной жилы также исключено ввиду малой мощности рыхлых отложений. Следовательно, эта крупная (в масштабах долины) впадина имеет тектоническое происхождение. Своей обособленностью она схожа с подробно описанной выше депрессией, но при сравнимом размере признаков существования под ней сквозного талика не наблюдается. Нет также следов современных либо недавних подвижек: конфигурация береговой линии на обоих снимках и по результатам обследований на местности остается практически неизменной. Вероятно, впадина водоема является реликтом периода локального усиления тектонической активности, намного опередившего рассмотренные выше процессы. Данные для обоснованных предположений о ее происхождении отсутствуют. Она служит свидетельством значительной площадной и временной дифференциации тектонической деятельности в пределах низкопорядковой долины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные явления и процессы при всей своей эффектности (учитывая скромный размер территории, на которой они развиты) вряд ли могут оказывать сколько-нибудь заметное влияние на эволюцию таликов ввиду своей высокой динамичности. Скоротечность и малые масштабы наблюдаемых гидрогеологических феноменов практи-

¹ В статье описаны последствия события, дату которого установить затруднительно. Но в июне 2021 г. сотрудниками Института биологических проблем Севера ДВО РАН на этом объекте были зафиксированы следы аналогичного катастрофического паводка, подмывшего и нагромодившего в русле свежераспустившиеся лиственницы; это позволило сузить временные рамки происшествия.

чески исключают их переход в долговременные тенденции. В долинах крупных водотоков аналогичные процессы и явления не могут обусловить столь же зримые проявления, хотя причины для их развития несомненно присутствуют.

Участок исследований расположен в районе с мало контрастным среднегорным рельефом и отсутствием признаков современной крупноблоковой тектонической активности. Несомненно, что их наличие отнюдь не исключает развитие процессов, аналогичных описанным – скорее наоборот, хотя в районах с интенсивными и высокоамплитудными тектоническими подвижками эффекты малых масштабов оказываются завуалированными. Вероятно, в гористых местностях и предгорьях они распространены практически повсеместно.

Итак, участок исследований не является уникальным с точки зрения развития описанных процессов, но он представляет собой как бы идеальный фон для максимально отчетливого проявления эффектов мелкоблоковой тектоники благодаря отсутствию маскирующих факторов.

Рассмотренные явления, наряду с описанными в работе [Михайлов, 2021], не находят исчерпывающих объяснений в рамках существующих представлений о минимальных размерах подвижных относительно друг друга тектонических блоков, что свидетельствует о необходимости модификации этих представлений.

Литература

- Баранова Ю.П., Бискэ С.Ф.** Позднеплиоценовый – четвертичный этап рельефообразования на Северо-Востоке СССР // Геология и геофизика, 1967, № 3, с. 3–11.
- Баранская А.В.** Роль новейших вертикальных тектонических движений в формировании рельефа побережий российской Арктики: Дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2015, 236 с.
- Калабин А.И.** Вечная мерзлота и гидрогеология Северо-Востока СССР // Тр. ВНИИ–1. Магадан, 1960, т. XVIII, 470 с.
- Калинина Л.Ю., Смирнов В.Н.** Количественный анализ связи землетрясений с относительной амплитудой активных разломов на юго-восточном фланге сейсмического пояса Черского // Вестн. СВНЦ ДВО РАН, 2017, № 2, с. 24–29.
- Карта активных разломов.** Лист Р-55-56 – Сусуман. Источник: База данных активных разломов Евразии (AFEAD). Масштаб 1:1 000 000. 2020. – <http://neotec.ginras.ru/database.html>
- Лилиенберг Д.А.** Пространственно-временные проявления современной эндодинамики рельефа и их взаимосвязь с экзодинамикой (на примере горных стран) // Развитие рельефа и его устойчивость. М., Наука, 1993, с. 87–97.
- Методические** рекомендации по интерпретации кривых вертикального электрического зондирования при поисках подземных вод на трассе БАМ. М., ВНИИТС, 1978, 50 с.
- Михайлов В.М.** Вариации и оценки средних максимальных расходов воды в реках Северо-Востока России // Вестн. СВНЦ ДВО РАН, 2014, № 2, с. 21–26.
- Михайлов В.М.** Реки горных территорий Северо-Востока России: однородность и разнообразие морфологических

характеристик их русел // Геоморфология, 2015, № 1, с. 3–13.

Михайлов В.М. К вопросу о режиме водных объектов Охотско-Колымского водораздела // Вестн. СВНЦ ДВО РАН, 2021, № 2, с. 68–76.

Михайлов В.М., Банцкекина Т.В. Грунтово-фильтрационный талик в континентальной дельте р. Буянда (Сеймчано-Буяндинская впадина) // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 2, с. 20–28.

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши // Государственный водный кадастр. Т. 1, вып. 17. Л., Гидрометеиздат, 1985, 430 с.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6, ч. 2. Л., Гидрометеиздат, 1972, 166 с.

Нестерева М.И. Возникновение и распространение термокарстовых озер на территории Якутии // Молодой ученый, 2012, № 9, с. 79–82.

Уфимцев Г.Ф. Морфотектоника Евразии. Иркутск, Изд-во Иркут. ун-та, 2002, 493 с.

Шведов С.Д. Неотектонические разломы Килганских гор и новейшая геодинамика (Северо-Восточное Приохотье) // Вестн. СВНЦ ДВО РАН, 2010, № 4, с. 12–19.

Шпикерман В.И., Полуботко И.В., Васькин А.Ф. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Сер. Верхояно-Колымская. Лист Р-55 – Сусуман. Объяснит. зап. СПб., Картогр. фабрика ВСЕГЕИ, 2016, 522 с. + вкл.

Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под ред. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 311 с.

References

- Baranova Yu.P., Biske S.F. Late Pliocene–Quaternary stage of relief formation in the North-East of the USSR. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 1967, No. 3, p. 3–11 (in Russian).
- Baranskaya A.V. Role of the newest vertical tectonic movements in the formation of the relief of the Russian Arctic coasts: Dissertation ... candidate of geogr. sciences. St. Petersburg, 2015, 236 p. (in Russian).
- Kalabin A.I. Vechnaya merzloty i gidrogeologiya Severo-Vostoka SSSR [Permafrost and hydrogeology of the North-East of the USSR]. In: Transactions of VNI-1. Magadan, 1960, vol. XVIII, 470 p. (in Russian).
- Kalinina L.Yu., Smirnov V.N. Quantitative analysis of the relationship between earthquakes and the relative amplitude of active faults on the southeastern flank of the Chersky seismic belt. *Vestnik SVNTs DVO RAN* [Bulletin of the NESCFEB RAS], 2017, No. 2, p. 24–29 (in Russian).
- Karta aktivnykh razlomov [Map of active faults], 2020. Sheet P-55-56 Susuman. Source: Database of Active Faults of Eurasia and adjacent Aquatories (AFEAD). Scale: 1:1 000 000. 2020. – <http://neotec.ginras.ru/database.html>
- Lilienberg D.A. Spatial and temporal manifestations of modern endodynamics of relief and their interrelation with exodynamics (on the example of mountainous countries). In: *Razvitie rel'efa i ego ustoichivost'* [Relief development and its stability]. Moscow, Nauka, 1993, p. 87–97 (in Russian).
- Metodicheskie rekomendacii po interpretacii krivyykh vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniya pri poiskakh podzemnykh vod na trasse BAM [Methodological recommendations for the interpretation of vertical electrical sounding curves when

- searching for groundwater along the BAM route]. Moscow, VNIITS, 1978, 50 p. (in Russian).
- Mikhailov V.M. Variations and evaluations of yearly maximum water discharges in rivers of the North-Eastern Russia. Vestnik SVNTs DVO RAN [Bulletin of the NESC FEB RAS], 2014, No. 2, p. 21–26 (in Russian).
- Mikhailov V.M. Rivers of the mountainous territories of the North-Eastern Russia: uniformity and diversity of morphological characteristics of their channels. Geomorphologiya [Geomorphology], 2015, No. 1, p. 3–13 (in Russian).
- Mikhailov V.M. On the issue of the regime of water bodies in the Okhotsk-Kolyma watershed. Vestnik SVNTs DVO RAN [Bulletin of the NESC FEB RAS], 2021, No. 2, p. 68–76 (in Russian).
- Mikhailov V.M., Bantsekina T.V. Ground-filtration talik in the continental delta of the Buyunda River (Seymchan-Buyunda Depression). Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2001, vol. V, No. 2, p. 20–28 (in Russian).
- Mnogoletnie dannyye o rezhime i resursax poverkhnostny'x vod sushi (Gosudarstvenny'y vodny'y kadastr) [Long-term data on the regime and resources of land surface waters (State Water Cadastre)]. Vol. 1, iss. 17. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 430 p. (in Russian).
- Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam [Instruction to hydrometeorological stations and posts]. Issue 6, part 2. Leningrad, Gidrometeoizdat, 166 p. (in Russian).
- Nestereva M.I. Origin and distribution of thermokarst lakes in the Yakutia territory. Molodoi uchenyi [Young Scientist magazine], 2012, No. 9, p. 79–82 (in Russian).
- Ufimtsev G.F. Morfotektonika Yevrazii [Morphotectonics of Eurasia]. Irkutsk, Izd-vo IGU, 2002, 493 p. (in Russian).
- Shvedov S.D. Neotectonic faults of the Kilgan Mountains and the latest geodynamics (North-Eastern Priokhotee). Vestnik SVNTs DVO RAN [Bulletin of the NESC FEB RAS], 2010, No. 4, p. 12–19.
- Shpikerman V.I., Polubotko I.V., Vaskin A.F. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii [State geological map of Russian Federation]. Scale 1:1 000 000 (the third generation) Verkhoyansk-Kolyma Series Sheet 55 Susuman. Explanatory memorandum. St. Petersburg, VSEGEI, 2016, 522 p. (in Russian).
- Electrical prospecting: manual on electrical prospecting practice for students of geophysical specialties. V.K. Khmelevsky, I.N. Modin, A.G. Yakovlev (eds.). Moscow, Moscow University Press, 2005, 311 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 26 сентября 2024 г.,
после доработки – 11 мая 2025 г.,
принята к публикации 3 августа 2025 г.*

ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 624.139.6

DOI: 10.15372/KZ20250504

EDN: OSAFSU

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ, НАПРАВЛЕННОЕ
НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ
АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ****О.Ф. Данилов¹, А.Н. Краев¹, З.Ш. Шанхоев^{1,*}, А.И. Синицкий²**¹ Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия² ГАУ ЯНАО “Научный центр изучения Арктики”, 629008, Салехард, ул. Республики, 20, Россия

*Автор для контакта; e-mail: shanhoevzs@tyuiu.ru

Разработано конструктивно-технологическое решение, направленное на изменение температурного режима и сохранение верхней границы многолетнемерзлых грунтов основания на требуемой глубине. Выявлены основные причины разрушения автомобильных дорог в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Численным моделированием установлено влияние воды, скопившейся у подошвы земляного полотна, на изменение во времени наклонной границы многолетнемерзлых грунтов основания в зависимости от заложения откоса автомобильной дороги. Численным моделированием подобраны основные геометрические параметры конструктивно-технологического решения, влияющие на изменение температуры грунтов основания. Методом математического планирования эксперимента выведены уравнения регрессии, описывающие изменение во времени угла наклонной границы многолетнемерзлых грунтов в основании автомобильной дороги.

Ключевые слова: автомобильная дорога, устойчивость основания, конструктивно-технологическое решение, температурный режим, многолетнемерзлые грунты.

Ссылка для цитирования: Данилов О.Ф., Краев А.Н., Шанхоев З.Ш., Синицкий А.И. Конструктивно-технологическое решение, направленное на изменение температурного режима грунтов основания автомобильной дороги // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 5, с. 38–44. DOI: 10.15372/KZ20250504. EDN: OSAFSU.

**A DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTION AIMED AT CHANGING
THE TEMPERATURE REGIME OF THE ROAD BASE SOILS****O.F. Danilov¹, A.N. Kraev¹, Z.Sh. Shankhoev^{1,*}, A.I. Sinitskiy²**¹ Tyumen Industrial University, Volodarskogo St. 38, Tyumen, 625000 Russia² Scientific Center for Arctic Studies, Respubliki St. 20, Salekhard, 629008 Russia

*Corresponding author; e-mail: shanhoevzs@tyuiu.ru

A design and technological solution to modify the soil temperature regime and maintain the upper boundary of permafrost in the roadbed at the required depth was developed. The main causes of road failure in permafrost regions were identified. The effect of water accumulated at the base of the roadbed on the temporal variation of the inclined permafrost table depending on the road slope was studied using numerical modeling. Numerical modeling was used to select the key geometric parameters of the design and technological solution controlling the temperature variation of the foundation soils. Regression equations describing the temporal variation of the slope of permafrost table in the roadbed were obtained using the mathematical planning of the experiment.

Keywords: highway, foundation stability, design and technological solution, temperature conditions, permafrost soils.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетнемерзлые грунты (ММГ) занимают до 65 % территории России. По характеру распространения многолетняя мерзлота подразделяется на сплошную, прерывистую и островную. В области распространения ММГ находятся важнейшие объекты топливно-энергетического ком-

плекса и инфраструктуры, развитие которых является залогом экономического благосостояния страны. Районы России, расположенные в области распространения ММГ, даже при сравнительно малой численности населения, обеспечивают до 11 % валового внутреннего продукта страны, глав-

ным образом за счет добычи природных ресурсов. Следовательно, разведанные запасы месторождений нефти и газа, а также темпы их освоения будут только расти [Коротков и др., 2015].

Для комплексного освоения территории Севера, где в основном преобладают ММГ, необходимо возводить качественные автомобильные и железные дороги. Возведение насыпи на многолетнемерзлых грунтах вызывает изменение естественных условий теплообмена. Нарушение естественного теплообмена между атмосферой и ММГ основания приводит к изменению геометрического расположения границы ММГ под сооружением, что, в свою очередь, способствует потере устойчивости основания автомобильной дороги. Постоянное или периодическое скопление воды у подошвы земляного полотна формирует фильтрационный поток на границе “основание – земляное полотно” (рис. 1). Влияние данного фактора приводит к изменению температурного режима и напряженно-деформированного состояния грунтов, что обуславливает сокращение сроков нормальной эксплуатации линейного объекта (автомобильной дороги).

Для повышения транспортно-эксплуатационных характеристик сети автомобильных дорог разрабатываются различные мероприятия, способствующие обеспечению непрерывного потока транспортных средств. В основном эти мероприятия направлены на сохранение верхнего горизонта многолетнемерзлых грунтов (ВГММГ) под сооружением [Валиев, 2019].

Влияние водоема на изменение температурного режима грунтов основания земляного полотна

Проблемой водоотвода от автомобильных и железных дорог в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов посвящены научные труды Е.С. Ашпица, Н.И. Быкова, В.В. Воронцова, В.В. Гулецкого, П.И. Дыдышко, С.М. Ждановой, В.А. Кудрявцева, А.В. Куртинова, Н.П. Костенко, А.Н. Краева, П.Н. Каптерева, Г.И. Куркова, К.Д. Морозова, Н.Д. Меренкова, Г.П. Минайлова, Н.П. Мурованного, В.В. Пассека, Н.А. Перетрухина, Г.С. Пересенкова, М.И. Сумгина, И.Д. Ткачевского, Н.И. Хвостика, А.А. Цернанта, Н.А. Цуканова и др.

Нарушение естественного стока воды при возведении земляного полотна приводит к скоплению воды у его подошвы, что негативно отражается на температурном режиме грунтов основания [Игошин и др., 2016; Горелик, Земеров, 2020]. С.Н. Юсуповым [2003] разработана конструкция фильтрующей выемки с применением каменной наброски, что позволяет поддерживать грунты основания в требуемом температурном диапазоне при сохранении продольной фильтрации.



Рис. 1. Скопление воды у подошвы земляного полотна [Ашпиз, 2014].

В работе О.В. Тукмаковой [2022] представлены результаты обследования 25-километрового участка перегона Денисовский–Чульман АК “ЖДЯ”. Установлено, что обводнение данного участка способствовало оттаиванию многолетнемерзлого основания земляного полотна от 2 до 3 м. В качестве мероприятия для стабилизации земляного полотна было разработано конструктивно-технологическое решение “контрбанкетов переменного сечения”.

Наличие фильтрации грунтовых вод способствует изменению теплового режима грунтов основания и земляного полотна. Я.В. Клочковым [2015] разработан и обоснован способ (противофильтрационный экран) для остановки фильтрации воды сквозь основание сооружения. Данное решение направлено на повышение надежности сооружения.

Коллективом авторов были разработаны конструктивные решения, способствующие ограничению теплового влияния поверхностных вод, расположенных вдоль откосных частей сооружения [Макаров и др., 2018].

Разработка конструктивно-технологического решения и обоснование его оптимальных геометрических параметров

Для уменьшения влияния от тепловых источников (скопления воды у подошвы земляного полотна) через откосную часть земляного полотна и фильтрации воды на границе “основание – земляное полотно” было разработано (рис. 2) конструктивно-технологическое решение (КТР), способствующее изменению температурного режима и напряженно-деформированного состояния грунтов многолетнемерзлого основания земляного полотна.

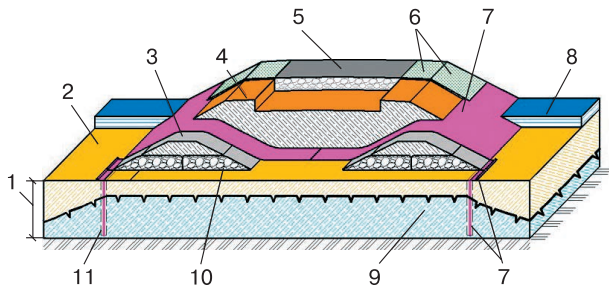


Рис. 2. Схема конструктивно-технологического решения.

1 – мощность сезоннооттаивающего слоя грунта основания; 2 – дневная поверхность грунта; 3 – геоконтейнер; 4 – грунт земляного полотна; 5 – дорожная одежда; 6 – биоматы с присыпкой некondиционным грунтом толщиной 0.03 м; 7 – водонепроницаемый геотекстиль; 8 – постоянное или периодическое скопление воды; 9 – многолетнемерзлый грунт; 10 – гранулированный теплоизоляционный материал; 11 – траншея для размещения водонепроницаемого текстиля.

Для исключения попадания воды в основание земляного полотна прокладывают продольную траншею. Следующим шагом является (ручное) раскатывание рулона из водонепроницаемого полотна с максимальным натяжением материала для устранения перекосов. Рулон раскатывают в поперечном направлении земляного полотна с запасом по обеим его сторонам, достаточным для смыкания верхних ветвей полуобоймы. Далее в траншею вертикально помещают нижние ветви полуобоймы. После размещения водонепроницаемого полотна производят обратную засыпку траншеи тем же выработанным грунтом с последующим послойным уплотнением. В откосной части земляного полотна в трапецевидальной форме располагают теплоизоляционные геоконтейнеры, наполненные искусственным гранулированным теплоизоляционным материалом (ИГТМ), позволя-

ющим снизить тепловое влияние от скопления воды у подошвы земляного полотна. Применяют ИГТМ для сохранения ВГММГ, а водонепроницаемые геоконтейнеры используют для защиты теплоизоляционного материала от попадания в него воды. После укладки теплоизоляционных геоконтейнеров с ИГТМ свободные края водонепроницаемого полотна заводят на поверхность с максимальным натяжением. Далее выполняют послойную отсыпку и уплотнение земляного полотна на ММГ. Полуобоймы устраивают для повышения устойчивости многолетнемерзлого основания земляного полотна и предотвращения массового проникновения воды в тело земляного полотна через откосную часть за счет инфильтрации и в многолетнемерзлое основание за счет фильтрации. Для снижения негативного влияния экзогенных процессов в откосной части земляного полотна автомобильной дороги на ММГ устраивают биоматы с присыпкой из некondиционных грунтов. Далее переходят к устройству конструктивных слоев дорожной одежды. Схема КТР представлена на рис. 2.

Численным моделированием в программном комплексе QFrost при различных начальных граничных условиях были определены геометрические параметры (рис. 3) конструктивно-технологического решения (b_{pr1} – ширина верхней части геоконтейнера, b_{pr2} – ширина нижней части геоконтейнера, $1:m_2$ – заложение внутреннего откоса геоконтейнера).

Согласно исследованиям Л.Н. Хрусталева [2005], температура в основании земляного полотна у кромки проезжей части (характерная точка) должна быть отрицательной, что обеспечивает пластично-мерзлое состояние грунтов в основании под главной площадкой сооружения (рис. 4). Если температура положительная, то необходимо вводить дополнительные мероприятия по понижению температуры. В качестве критериев эффек-



Рис. 3. Вариативные геометрические параметры конструктивно-технологического решения.

h_v – глубина воды; h_{gr} – высота теплоизоляционного материала в геоконтейнере; h_{gf} – высота грунта в геоконтейнере; b_{tr} – ширина траншеи; b_{pr1} , b_{pr2} – ширина верхней и нижней части геоконтейнера; $1:m_1$ – заложение внешнего откоса геоконтейнера; $1:m_2$ – заложение внутреннего откоса геоконтейнера.

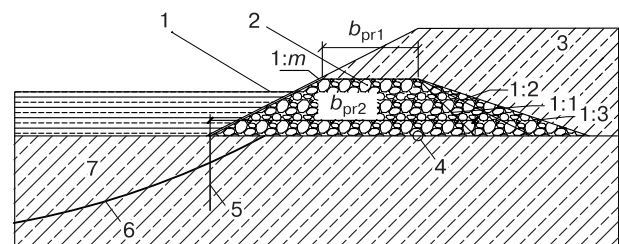


Рис. 4. Расчетная схема расположения характерной точки измерения температуры грунта.

$1:m$ – заложение внешнего откоса геоконтейнера; $1:1$, $1:2$, $1:3$ – заложение внутреннего откоса геоконтейнера. 1 – постоянное или периодическое скопление воды у подошвы земляного полотна; 2 – теплоизоляционный геоконтейнер; 3 – земляное полотно; 4 – характерная точка измерения температуры грунта; 5 – водонепроницаемое полотно; 6 – граница ММГ; 7 – оттаявший слой основания.

тивности вариаций геометрических параметров предложенного КТР были выбраны параметры, наиболее сильно влияющие на изменение температурного режима грунтов основания земляного полотна в характерной точке на первый год эксплуатации в период максимального оттаивания. При выполнении численного моделирования фиксировались значения температуры ММГ, мощности таликовой зоны и угла наклона верхней границы ММГ (α_t) в основании земляного полотна на первый год эксплуатации в период максимального оттаивания. Вариативные геометрические параметры КТР представлены на рис. 3.

Геометрические параметры: ширина обочины (B_{ob}), ширина проезжей части (B_{pch}), высота дорожной одежды (h_{do}), высота земляного полотна (H_{zp}), заложение откоса ($1:m_1$) – принимаются согласно техническому паспорту автомобильной дороги. Ширина продольной траншеи назначается исходя из технологической операции по размещению водонепроницаемого полотна и последующего уплотнения траншеи выработанным грунтом, но не менее 0.5 м. Глубина траншеи определяется по теплотехническому расчету (ниже деятельного слоя) для защемления водонепроницаемого материала в толщу ММГ. Минимальный нахлест материала по оси сооружения должен быть не менее 0.3 м. Высота теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) должна быть на 0.1 м выше максимально возможного уровня скопившейся воды (h_v) у подшвы земляного полотна.

Заложение внешнего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) принималось идентично заложению откоса автомобильной дороги. В качестве ИГТМ рассматривался ДиатомИК с теплофизическими характеристиками: теплопроводность 0.1 Вт/(м·°C), теплоемкость 576 Дж/(м³·°C). Климатические условия при численном моделировании назначались по метеостанции г. Надым, теплофизические характеристики грунтов основания земляного полотна принимались согласно [СП 25.13330.2020, 2020].

Среднемесячная температура воздуха представлена в таблице. На нижней границе и на боковых поверхностях рассматриваемого инженерно-геологического разреза моделировались граничные условия второго рода. Температура по всему массиву основания принималась равной температуре начала замерзания (T_{bf}) грунта (песок, супесь, суглинок, глина) в зависимости от его типа ($T_{bf}^{sand} = -0.10$ °C, $T_{bf}^{sandy\ loam} = -0.15$ °C, $T_{bf}^{loam} = -0.20$ °C, $T_{bf}^{clay} = 0.20$ °C). На верхней границе модели задавались граничные условия третьего рода. После этого выполнялась калибровка модели путем расчета основания на 100 лет и сопоставления величин деятельного слоя и средней температуры многолетнемерзлого основания с

нормативными значениями. При численном моделировании рассматривались грунты основания земляного полотна, наиболее часто встречающиеся на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Границы варьирования внутреннего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) следующие: 1:1, 1:2, 1:3. Результаты численного эксперимента по изменению температуры грунтов в зависимости от угла заложения внутреннего откоса (призмы) ($1:m_2$) в характерной точке представлены на рис. 5.

По результатам численного моделирования установлено, что при заложении внутреннего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) 1:1 с максимальным соотношением $b_{pr1}/b_{pr2} = 0.25$ формируется отрицательная температура $T = -0.03...-0.02$ °C. При заложении внутреннего откоса 1:2 также формируется отрицательная температура $T = -0.03...-0.15$ °C, кроме песчаных грунтов с суммарной влажностью мерзлого грунта $W_{tot} = 20-25$ % при минимальном соотношении $b_{pr1}/b_{pr2} = 0.13$, когда температура положительная $T = 0.09-0.02$ °C. При заложении внутреннего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) 1:3 во всех случаях формируется отрицательная температура, однако при этом происходит перерасход ИГТМ на 20 % в сравнении с заложением откоса 1:2, а снижение температуры для песчаных грунтов составляет $T = 0.12-0.07$ °C. Наиболее эффективное заложение внутреннего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) равно 1:2.

Из результатов численных экспериментов следует, что отрицательная температура грунтов основания земляного полотна с ММГ в характерной точке (см. рис. 4) обеспечивается устройством теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) для песчаных грунтов ($W_{tot} = 20, 25$ %) высо-

Среднемесячная температура воздуха по данным метеостанции г. Надым

Месяц	Температура воздуха, °C
I	-24.5
II	-24.0
III	-16.8
IV	-8.8
V	-1.0
VI	8.8
VII	15.5
VIII	11.4
IX	5.6
X	-5.4
XI	-16.1
XII	-21.9

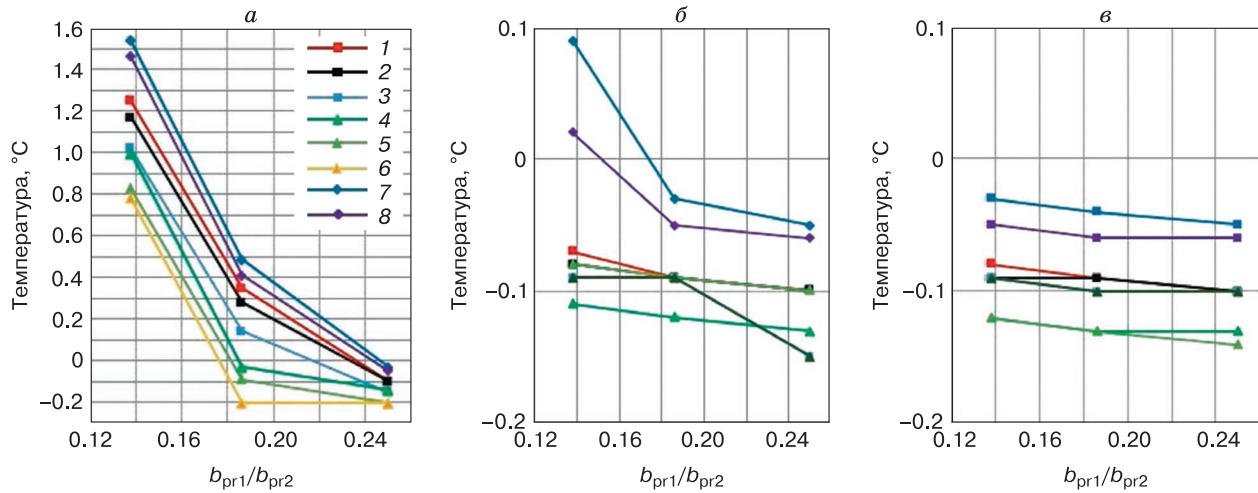


Рис. 5. Результаты численного эксперимента по заложению внутреннего откоса теплоизоляционного геоконтейнера (призмы): 1:1 (а), 1:2 (б), 1:3 (в).

На оси абсцисс отложено отношение верхней части призмы к нижней ее части. 1–3 – супесь ($1 - W_{tot} = 25\%$, $2 - W_{tot} = 30\%$, $3 - W_{tot} = 35\%$); 4–6 – суглинок, глина ($4 - W_{tot} = 25\%$, $5 - W_{tot} = 30\%$, $6 - W_{tot} = 35\%$); 7, 8 – песок ($7 - W_{tot} = 20\%$, $8 - W_{tot} = 25\%$), где W_{tot} – суммарная влажность мерзлого грунта.

той $h_{pr} = 0.7–0.9$ м, для супесей ($W_{tot} = 20, 30, 35\%$) $h_{pr} = 0.5–0.6$ м, для суглинков и глин ($W_{tot} = 20, 30, 35\%$) $h_{pr} = 0.4–0.6$ м. Графики изменения высоты теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) представлены на рис. 6.

Численным моделированием установлено, что для грунтов с влажностью более 25 % при высоте теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) 0.5 м фиксируется отрицательная температура. Увеличение высоты теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) от 0.6 до 1 м способствует понижению температуры в характерной точке при

влажности грунтов от 20 до 25 % на ~ 0.28 °C (для песчаных грунтов) и на ~ 0.14 °C (для глинистых грунтов). Отсюда следует, что возможно снижение высоты ИГТМ с использованием местного грунта.

Для расчета снижения угла наклонной границы ММГ (α_t) использовался метод математического планирования эксперимента. В качестве варьируемых параметров принимали высоту ИГТМ, вид и влажность грунтов основания земляного полотна. Графики изменения угла α_t наклонной границы ММГ во времени представлены на рис. 7.

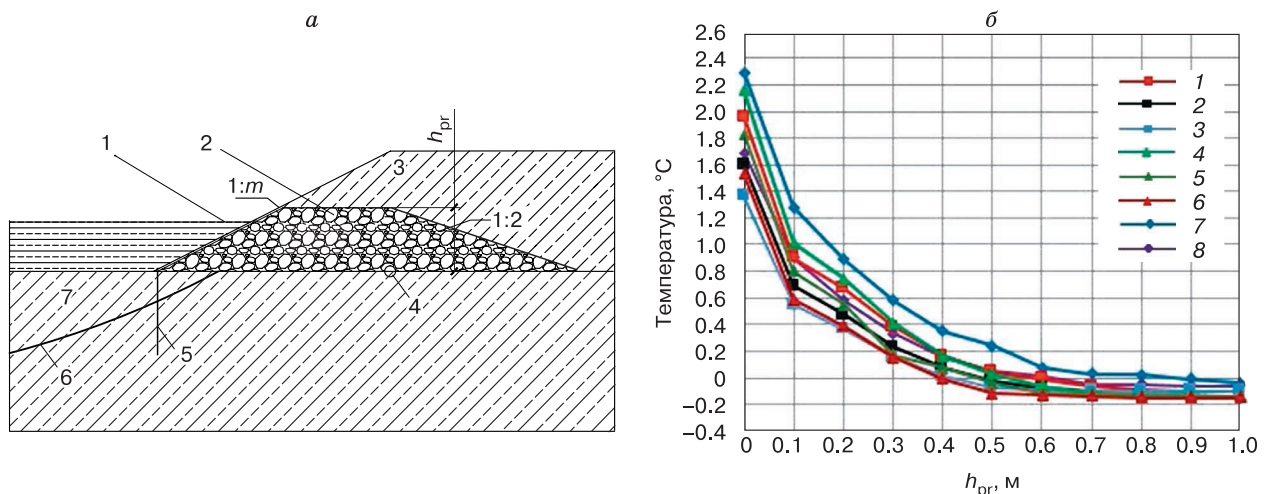


Рис. 6. Изменение температуры в характерной точке в зависимости от высоты геоконтейнера.

а – расчетная схема, обозначения см. на рис. 4; б – изменение температуры в контрольной точке в зависимости от высоты теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) h_{pr} , обозначения см. на рис. 5.

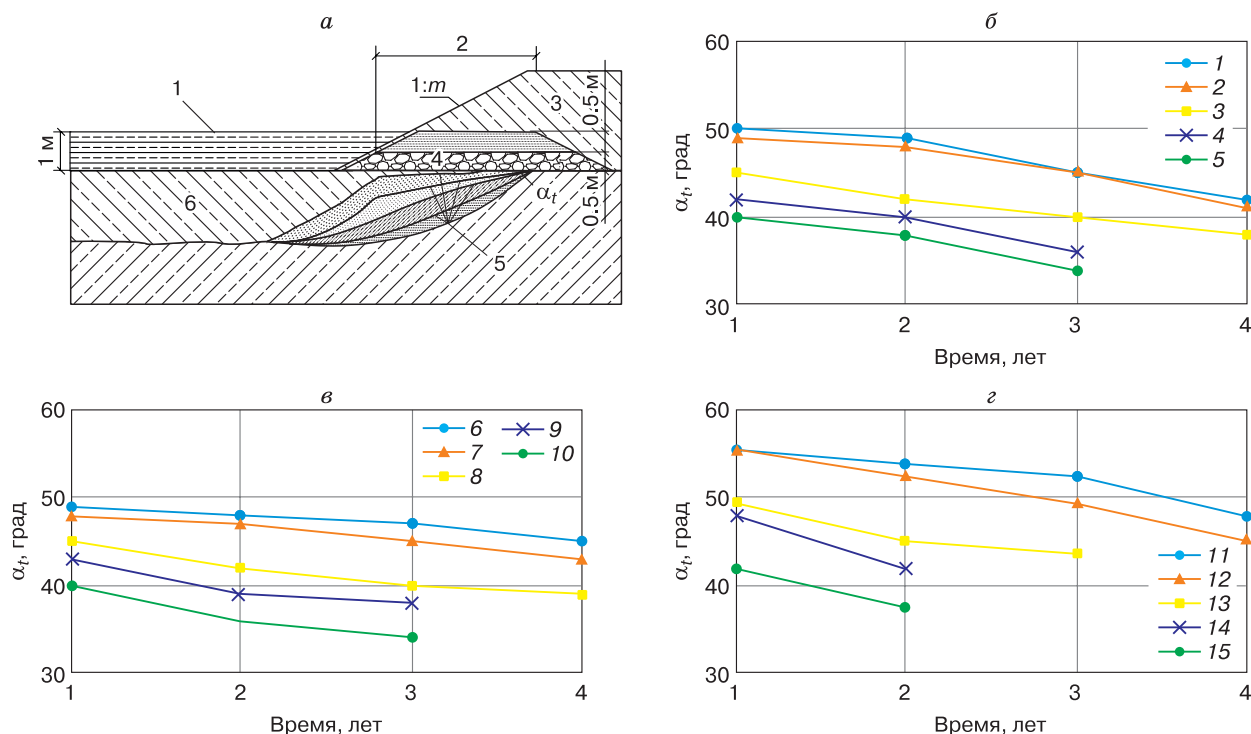


Рис. 7. Зависимости изменения наклонной границы (α_t) многолетнемерзлых грунтов от геометрического параметра (h_{pr}) теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) для различных грунтов.

a – расчетная схема: 1 – постоянное или периодическое скопление воды у подошвы земляного полотна; 2 – рассматриваемая область откосной части сооружения; 3 – земляное полотно; 4 – искусственный гранулированный теплоизоляционный материал; 5 – наклонная граница ММГ; 6 – оттаявший слой грунтового основания; α_t – угол наклона границы ММГ; 1:m – заложение наружного откоса призмы; *б* – суглинки, глины, $W_{tot} = 25-35\%$; *в* – супесь, $W_{tot} = 25-35\%$; *з* – песок, $W_{tot} = 20-25\%$; 1, 6, 11 – $h_{pr} = 0.1$ м; 2, 7, 12 – $h_{pr} = 0.2$ м; 3, 8, 13 – $h_{pr} = 0.3$ м; 4, 9, 14 – $h_{pr} = 0.4$ м; 5, 10, 15 – $h_{pr} = 0.5$ м.

На основе численного моделирования доказано, что наиболее эффективный результат наблюдается при высоте теплоизоляционного геоконтейнера (призмы) 0.5 м. Для глинистых грунтов и супеси наклонная граница ММГ смещается к нижней бровке на третий год эксплуатации земляного полотна. Для песчаных грунтов эта граница формируется у нижней бровки на второй год эксплуатации земляного полотна. Формирование наклонной границы в основании ММГ у нижней бровки сооружения не представляет эксплуатационной опасности для автомобильной дороги в целом.

Из полученных результатов рассчитаны уравнения регрессии:

для суглинка и глины (при $W_{tot} = 25-35\%$)

$$\alpha_t = 54.43 - 25.15h_{pr} \cdot 2.16T;$$

для песка (при $W_{tot} = 20-25\%$)

$$\alpha_t = 61.19 - 23.19h_{pr} \cdot 1.55T;$$

для супеси (при $W_{tot} = 25-35\%$)

$$\alpha_t = 53.68 - 26.95h_{pr} \cdot 1.51T,$$

где h_{pr} – высота теплоизоляционного геоконтейнера (призмы), м; T – период эксплуатации земляного полотна, лет.

ВЫВОДЫ

На основании литературных источников и проведенных численных экспериментальных исследований сделаны следующие выводы.

1. Основные причины разрушения земляного полотна связаны с протаиванием грунтов многолетнемерзлого основания.

2. Естественное нарушение теплообмена и скопление воды у подошвы земляного полотна приводят к понижению ВГММГ и формированию наклонной границы ММГ в основании сооружения, которая снижает устойчивость основания.

3. Разработано конструктивно-технологическое решение, позволяющее изменить температурный режим грунтов основания и сохранить ВГММГ под основной площадкой земляного полотна.

4. На основе численного моделирования подобраны геометрические параметры конструктивно-технологического решения и получены уравне-

ния регрессии, позволяющие оценить изменение во времени угла наклона границы ММГ (α_t). Это дает возможность своевременно принимать решения о разработке дополнительных мероприятий на участках с постоянным или периодическим скоплением воды у подошвы земляного полотна.

Благодарности. Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания в сфере науки на выполнение научных проектов, осуществляемых коллективами образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России по проекту “Компьютерное моделирование механических, температурных и динамических процессов в слабых и многолетнемерзлых грунтах для обеспечения надежности грунтовых оснований инженерных сооружений” (FEWN-2024-0006).

Литература

- Ашпиз Е.С.** Наука о земляном полотне для железнодорожных магистралей // Евразия Вести. Сер. VII, 2014. – URL: <https://posh-geotextil.ru/pub/stati-i-obzory/-nauka-o-zemlyanom-polutne-dlya-zheleznodorozhnyh-magistralej.html> (дата обращения: 29.08.2025).
- Валиев Н.А.** Термокомплекс, защита от деградации оснований земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Трансп. инфраструктура Сиб. региона, 2019, т. 1, с. 538–541.
- Горелик Я.Б., Земеров И.В.** Влияние поверхностного обводнения на температурный режим мерзлых грунтов // Вестн. ТГУ. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2020, т. 6, № 1 (21), с. 10–40.
- Игошин М.Е., Парамонов М.В., Воронцов В.В.** Моделирование температурного режима основания эксплуатируемой автомобильной дороги с учетом конструктивного решения по стабилизации границы многолетнемерзлых грунтов // Геотехника, 2016, № 3, с. 34–41.
- Клочков Я.В.** Совершенствование методики расчета и регулирования температурного режима обводненных грунтовых оснований: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2015, 23 с.
- Коротков Е.А., Константинов А.О., Мельникова А.А., Иванов К.С.** “Диатомик” – новый теплоизоляционный материал для дорожного строительства в условиях криолитозоны // Вестн. СИБАДИ, 2015, вып. 1 (41), с. 55–61.
- Макаров А.С., Краев А.Н., Шанхоев З.Ш.** Конструктивно-технологические решения по устройству автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах // Интернет-журн. Трансп. сооружения, 2018, т. 5, № 4, с. 1–12.
- СП 25.13330.2020.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах: утв. М-вом строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации 30.12.2020: введ. в действие с 01.07.2021. М., Минстрой России, 2020, 143 с.

Тукмакова О.В. Разработка и обоснование конструктивно-технологических решений для строительства дополнительных железнодорожных путей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2022, 20 с.

Хрусталева Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 542 с.

Юсупов С.Н. Конструктивно-технологические решения устройств водоотвода для земляного полотна железных и автомобильных дорог на вечной мерзлоте: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2003, 32 с.

References

- Ashpiz E.S. Science about the earth track for railway lines. Eurasia Vesti. Series VII, 2014. – URL: <https://posh-geotextil.ru/pub/stati-i-obzory/-nauka-o-zemlyanom-polutne-dlya-zheleznodorozhnyh-magistralej.html> (last visited: 29.08.2025).
- Valiev N.A. Thermocomplex, protection against degradation of subgrade foundations on permafrost soils. Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transp. Infrastructure of the Siberian Region.], 2019, vol. 1, p. 538–541 (in Russian).
- Gorelik Ya.B., Zemerov I.V. Influence of surface flooding on the temperature regime of frozen soils. Vestnik TGU [Bulletin of the TSU. Phys. and mathematical modeling. Oil, gas, energy], 2020, vol. 6. No. 1 (21), p. 10–40 (in Russian).
- Igoshin M.E., Paramonov M.V., Vorontsov V.V. Modeling the temperature regime of the base of an operated highway taking into account the design solution for stabilizing the permafrost boundary. Geotekhnika [Geotechnics], 2016, No. 3, p. 34–41 (in Russian).
- Klochkov Ya.V. Improving the methodology for calculating and regulating the temperature regime of waterlogged soil foundations: Author's abstract. dis. candidate of technical sciences. Khabarovsk, 2015, 23 p. (in Russian).
- Korotkov E.A., Konstantinov A.O., Melnikova A.A., Ivanov K.S. “Diatomik” – a new thermal insulation material for road construction in the cryolithozone. Vestnik SIBADI [Bulletin of the SIBADI], 2015, issue 1 (41), p. 55–61 (in Russian).
- Makarov A.S., Kraev A.N., Shankhoyev Z.Sh. Structural and technological solutions for the construction of roads on permafrost soils. Internet-Journal. Transport Structures, 2018, vol. 5, No. 4, p. 1–12 (in Russian).
- SP 25.13330.2020: Foundations and bases on permafrost soils: approved by the Ministry of Construction and Housing and Public Utilities of the Russian Federation on 30.12.2020: entered into force on 01.07.2021. Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2020, 143 p. (in Russian).
- Tukmakova O.V. Development and justification of design and technological solutions for the construction of additional railway tracks: Author's abstract. dis. candidate of technical sciences. Khabarovsk, 2022, 20 p. (in Russian).
- Khrustaleva L.N. Osnovy geotekhniki v kriolitozone [Fundamentals of geotechnics in the cryolithozone]. Moscow, Moscow University Press, 2005, 542 p. (in Russian).
- Yusupov S.N. Design and technological solutions for drainage devices for the roadbed of railways and highways on permafrost: Author's abstract. dis. candidate of technical sciences. Moscow, 2003, 32 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 31 июля 2024 г.,
после доработки – 9 января 2025 г.,
принята к публикации 6 сентября 2025 г.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.837

DOI: 10.15372/KZ20250505

EDN: CJGIRM

СТРОЕНИЕ ИСТОЧНИКА ГИДРОГЕОГЕННОЙ НАЛЕДИ
В ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЕ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ) ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В.В. Оленченко *, А.А. Заплавнова, М.В. Медведева

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, лаборатория геоэлектрики,
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия**Автор для контакта; e-mail: olenchenkovv@ipgg.sbras.ru*

Наледеобразование является опасным инженерно-геологическим процессом, оказывающим негативное влияние на инженерные объекты. Для прогнозирования развития наледей или разработки эффективных противоналедных мероприятий необходимо определять местонахождение источника питания наледи и планировать места расположения водозаборных скважин. Эти задачи помогают решить геофизические методы. Целью работы было изучение строения участка разгрузки подземных вод, питающих гидрогеогенную наледь, для планирования противоналедных мероприятий. Исследования проведены методами георадиолокации георадаром ОКО-3 с антенной 250 МГц, бесконтактного измерения электрического поля с аппаратурой ВЕГА на частоте 16.5 кГц и методом электротомографии с измерением вызванной поляризации с аппаратурой Скала 64к15. По данным георадиолокации установлено, что глубина сезонного промерзания в пределах наледного бугра достигает 1.8–2.7 м. Выявлены признаки разгрузки подземных вод в виде локальных аномалий с уменьшением глубины сезонного промерзания до 1.3 м. Установлено, что наледный бугор располагается на сезонном бугре пучения с ледяным ядром, а в основании бугра в коренных породах выделены признаки разломной зоны. Зондирования методом электротомографии и построение объемных моделей распределения удельного электрического сопротивления и нормированной заряжаемости на глубину до 100 м позволили выявить и очертить ветвящиеся вертикальные каналы восходящей фильтрации подземных вод, питающих наледь групповым источником.

Ключевые слова: наледь, многолетнемерзлые породы, фильтрация подземных вод, георадиолокационное зондирование, электротомография, нормированная заряжаемость.

Ссылка для цитирования: Оленченко В.В., Заплавнова А.А., Медведева М.В. Строение источника гидрогеогенной наледи в Чуйской впадине (Горный Алтай) по геофизическим данным // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 5, с. 45–57. DOI: 10.15372/KZ20250505. EDN: CJGIRM.

GEOPHYSICAL MODEL OF THE HYDROGEOGENIC ICING SOURCE IN THE CHUYA BASIN (GORNYY ALTAI)

V.V. Olenchenko *, A.A. Zaplavnova, M.V. Medvedeva

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Laboratory of Geoelectrics, Akademika Koptuga Ave. 3, Novosibirsk, 630090 Russia***Corresponding author; e-mail: olenchenkovv@ipgg.sbras.ru*

Icing formation represents a hazardous engineering-geological process that adversely affects infrastructure facilities. To predict icing development and suggest adequate control measures, it is necessary to identify the location of the icing water source and plan the placement of water intake wells. Geophysical methods help solve these tasks. The objective of this study was to investigate the structure of the groundwater discharge zone feeding a hydrogeogenic icing to plan anti-icing measures. The investigations employed ground-penetrating radar (GPR) equipped with an OKO-3 system and a 250 MHz antenna, capacitive-coupled resistivity measurements using VEGA instrument at 16.5 kHz frequency, and electrical resistivity tomography with induced polarization measurements using Skala-64k15 system. GPR data revealed that the seasonal freezing depth within the icing mound reaches 1.8–2.7 m. Signs of groundwater discharge were identified as local anomalies with reduced seasonal freezing depth down to 1.3 m. The study established that the icing mound forms over a seasonal frost heave mound containing an ice core, while the bedrock base shows evidence of a fault zone. Electrical resistivity tomography surveys and 3D modeling of resistivity and normalized chargeability distributions to a depth of 100 m enabled the identification and delineation of branching vertical channels of ascending groundwater filtration. These channels form a group source feeding the icing.

Keywords: icing, permafrost, groundwater filtration, ground penetrating radar, electrical resistivity tomography, normalized chargeability.

ВВЕДЕНИЕ

Наледи – это распространенное явление в криолитозоне. В России они особенно распространены на северо-востоке, где их размеры могут достигать нескольких километров, а иногда и десятков километров [Алексеев и др., 2021]. Наледи также встречаются в Южной Якутии, Забайкалье, Бурятии, Горном Алтае.

Наледообразование – опасный процесс, вызывающий автомобильные и железные дороги и вызывающий подтопление зданий [Шестернёв, Верхотуров, 2016; Баишев и др., 2021; Верхотуров, 2024; Черных, 2025]. В исследованиях, в частности по северо-западу Канады, представлены подходы к предотвращению наледей, эффективность которых зависит от источника воды, типа инфраструктуры и ее роли в формировании наледи [Turcotte et al., 2023].

С развитием геофизической аппаратуры и программного обеспечения для обработки данных количество и качество информации, получаемой при изучении строения наледей и наледных полей, постоянно возрастает. В мировой практике активно применяются методы георадиолокации, электротомографии, тепловизионной съемки [Оленченко и др., 2023, 2024; Arcone et al., 1998; Walvoord et al., 2019; O'Neill et al., 2020; Terry et al., 2020; Liu et al., 2021; Walther et al., 2021], электромагнитные зондирования [Потанов, 2022; O'Neill et al., 2020] и, в редких случаях, ядерно-магнитный резонанс [Terry et al., 2020]. Основные задачи, решаемые с помощью геофизических методов, включают определение толщины льда, глубины сезонного промерзания, оконтуривание подрусловых таликов и выявление участков разгрузки подземных наледообразующих вод.

В Горном Алтае в 2000–2010 гг. было установлено, что более 75 % наледей формируются на высотах 800–2000 м и имеют цикл активизации каждые 2–4 года [Достовалова, Шитов, 2011]. Наледи оказывают значительное негативное воздействие на инфраструктуру, а существующие методы борьбы (например, валы) часто неэффективны.

Ранее геофизические исследования наледей в этом регионе не проводились. Такие данные важны для прогнозирования развития наледей и планирования защитных мероприятий, включая поиск источников питания и мест для водозаборных скважин [Свод правил, 2012].

Цель настоящей работы – изучить строение участка разгрузки подземных вод, питающих наледь, для планирования эффективных мер борьбы. Задачи исследования включают определение толщины наледи, глубины промерзания, границ мерзлых пород и каналов фильтрации подземных вод.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА

Участок исследований расположен в Чуйской впадине (Кош-Агачский район, Республика Алтай) вблизи трассы Р-256 и пос. Тобелер (рис. 1).

Геологически район сложен палеозойскими породами (сланцы, алевролиты, песчаники ташантинской свиты) и четвертичными флювиогляциальными отложениями [Зольников и др., 2010; Деев и др., 2012]. Территория относится к зоне островного распространения многолетнемерзлых пород (мощность до 56 м) [Мерзлотно-гидрогеологическая карта..., 1977; Шац, 1978].

Исследования проводились у подножия горы Мишельдык, где находится наледное поле в зоне солончаков [Шитов, 2018]. Здесь наблюдается разгрузка многочисленных источников [Достовалова, Шитов, 2011], зимой формирующих наледь с буграми пучения.

Изучаемый наледный бугор (размеры 45 × 30 м, высота 2 м) представлял собой сезонный гидролакколит с ледяным ядром (рис. 2). Толщина льда на вершине составляла 0.45 м. Разгружающиеся воды имели минерализацию 287 ppm, pH 9.4 и удельное электрическое сопротивление 16.7 Ом·м. В 30–50 м от бугра обнаружены воды с более высокой минерализацией (удельное сопротивление 5.5 Ом·м).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в два этапа: в марте (максимальное развитие наледи) и в июле (полное оттаивание).

На первом этапе применялись методы, не требующие заземления: георадиолокация (ГРЛ) на частотах 250 и 400 МГц по сети профилей (рис. 3, б) для определения толщины льда и бесконтактное измерение электрического поля (БИЭП) на частоте 16.5 кГц с использованием аппаратуры “ВЕГА” и дипольно-осевой установки.

На втором этапе использовался метод электротомографии с измерением вызванной поляризации (ЭТ–ВП) на двух площадках: поперек контура растаявшего наледного бугра и поперек геологического контакта пород (см. рис. 3, а).

Обработка данных ЭТ–ВП выполнялась в программах Res2Dinv и Res3Dinv, что позволило построить 2D-разрезы и 3D-модели распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) и поляризуемости.

Дополнительно был рассчитан параметр нормированной заряжаемости (m_n), который является индикатором зон фильтрации подземных вод [Калганов и др., 2022; Ustra et al., 2012; Abdulsamad et al., 2019] и связан с поверхностной проводимостью [Lesmes, Frye, 2001; Slater, Lesmes, 2002].

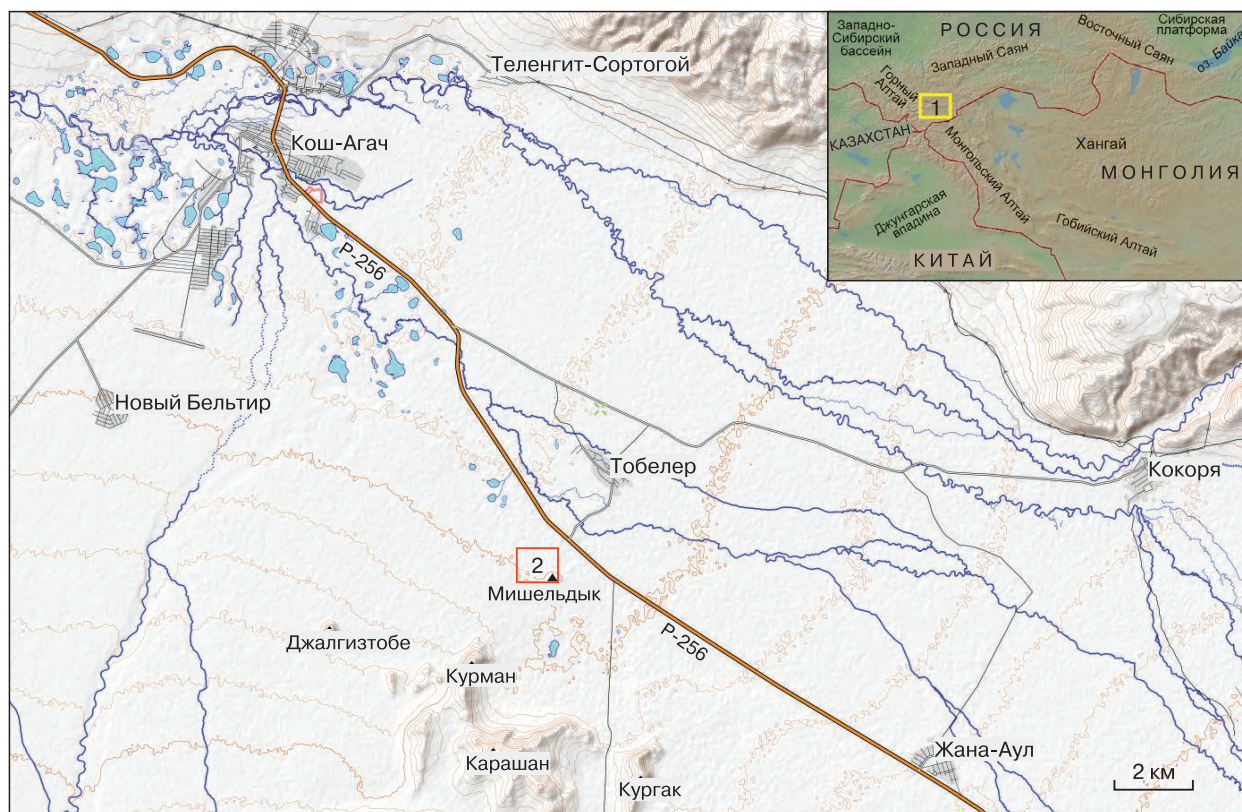


Рис. 1. Схема расположения района (1) и участка (2) исследований.



Рис. 2. Зондирования методом бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП) на наледном бугре.

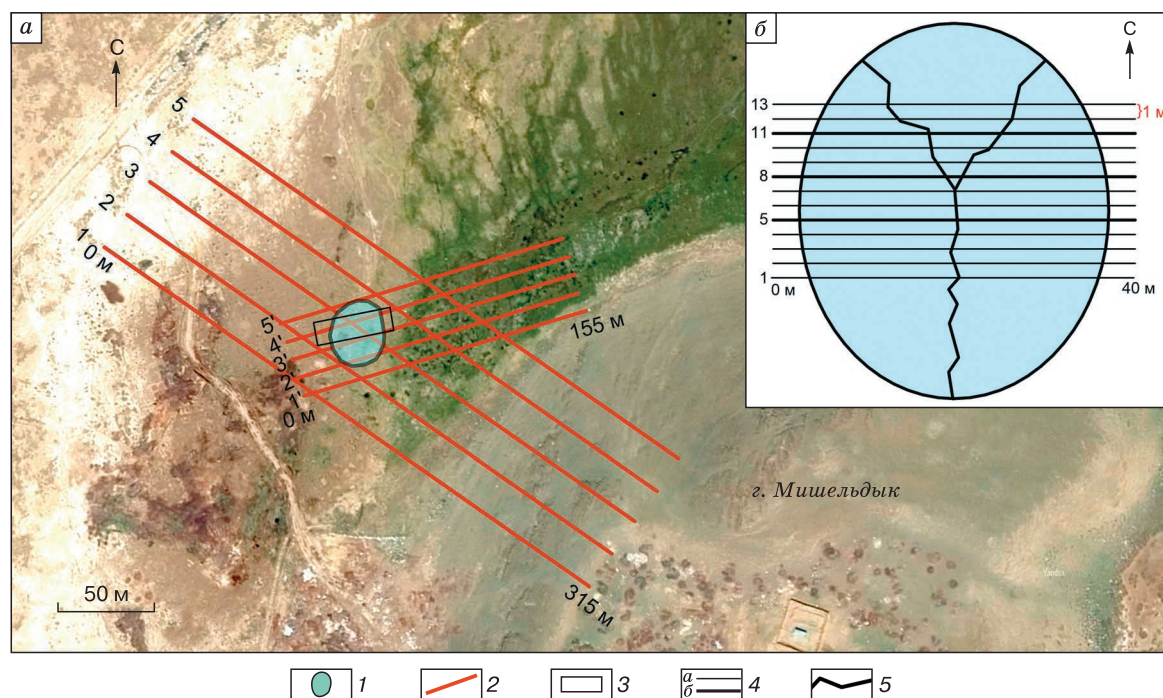


Рис. 3. Схема расположения профилей электротомографии с измерением вызванной поляризации (а), георадиолокации и бесконтактного измерения электрического поля (б).

1 – наледный бугор; 2 – профили электротомографии и их номера; 3 – площадь георадиолокации и БИЭП; 4 – профили ГРЛ (а) и БИЭП (б); 5 – трещины в наледном бугре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На радарограмме профиля № 8 (рис. 4, а) четко идентифицируются граница сезонномерзлого слоя (I), предполагаемая кровля коренных пород (II), зона трещины с разгрузкой вод, отмеченная гиперболами дифракции (III). Антенна 400 МГц позволила зафиксировать увеличение толщины льда от 0.05 м на периферии бугра до 0.45 м в его центре.

Послойная интерпретация с заданными диэлектрическими проницаемостями пород (см. рис. 4, б) показала, что глубина сезонного промерзания варьирует от 1.8 до 2.7 м, а кровля коренных пород залегает субгоризонтально, без погружения под бугром. При интерпретации было принято, что диэлектрическая проницаемость (ДП) сезонномерзлых пород равна 4, талых влажных суглинков – 17, обводненного щебня – 30, песчаников и алевролитов – 6 [Владов, Судакова, 2017].

По результатам 2D-инверсии данных БИЭП сезонномерзлый слой и лед характеризуются высокими значениями УЭС (3000–15 000 Ом·м) (см. рис. 4, в). При этом сопротивление сезонномерзлого слоя заметно понижается на краях наледного бугра, что, вероятно, связано с засоленностью пород [Шитов, 2018]. В зоне разгрузки подземные воды имеют относительно низкую минерализацию

и УЭС около 16 Ом·м, что в три раза выше, чем у вод местных солончаков. Слой талых рыхлых отложений обладает УЭС 100–300 Ом·м. Ниже залегают высокоомные породы (3000–15 000 Ом·м), интерпретируемые как коренной коколь. Под куполом бугра выявлена вертикальная аномалия пониженного УЭС (до 1000 Ом·м) – предполагаемая зона разлома, служащая путем разгрузки подземных вод. Стоит отметить, что по данным БИЭП кровля коренных пород залегает глубже, чем по данным ГРЛ. Это расхождение может быть вызвано неучетом латеральных изменений диэлектрической проницаемости, эквивалентностью резистивной модели или влиянием электрической анизотропии в слое рыхлых пород [Кожевников, Никифоров, 1997].

На карте глубины сезонного промерзания пород, полученной по данным площадных измерений ГРЛ (рис. 5), выделяются локальные участки уменьшения глубины сезонного промерзания с 2.8 до 1.3 м. Скорее всего, эти участки отмечают положение каналов разгрузки подземных вод в бугре пучения. Хорошо видно, что разгрузка подземных вод происходила по нескольким каналам (см. рис. 5) и представляет собой так называемый групповой выход подземных вод [Геологический словарь, 1978].

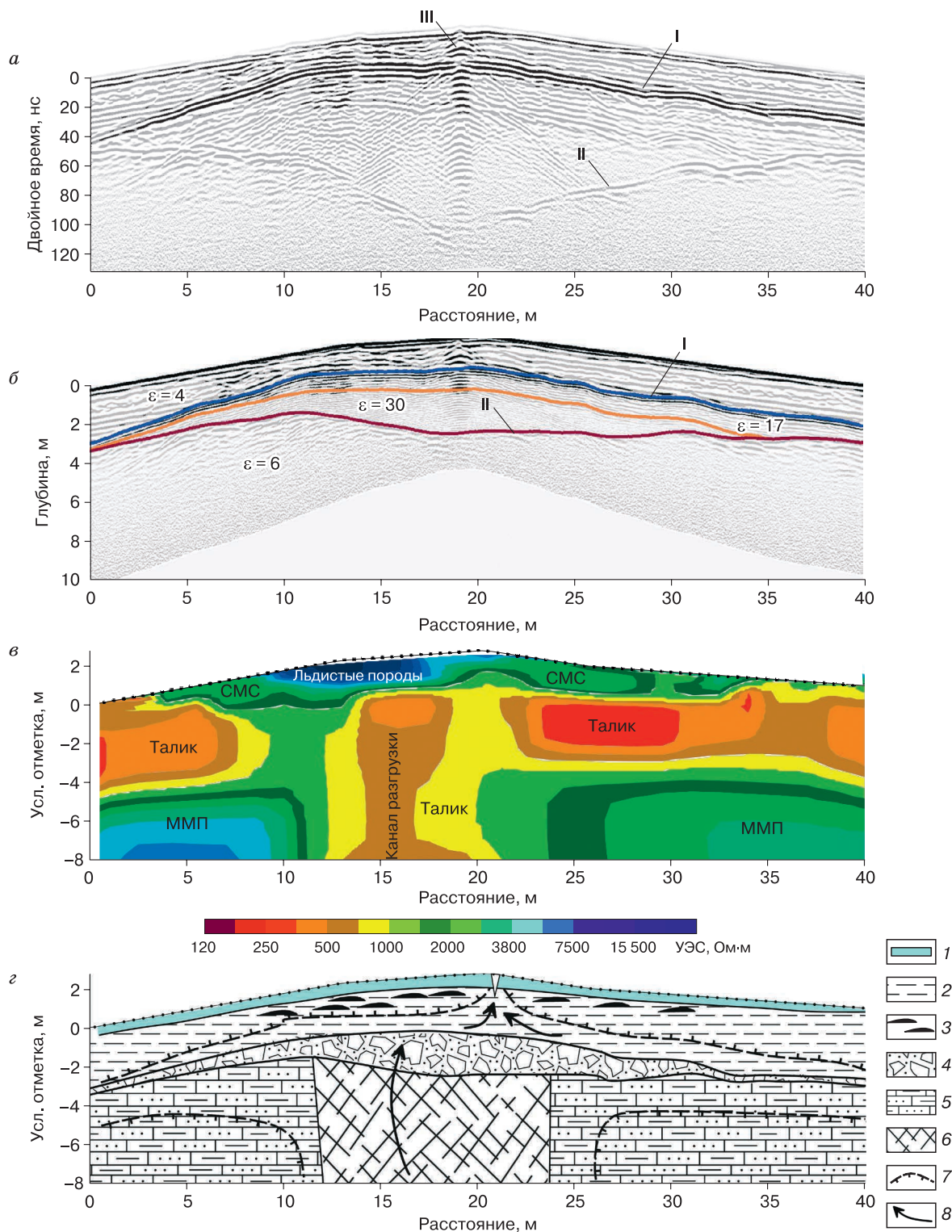


Рис. 4. Результаты георадиолокации и бесконтактного измерения электрического поля по профилю № 8.

a – исходная радарограмма; *б* – послойная интерпретация; *в* – геоэлектрический разрез по данным БИЭП; *г* – интерпретационный разрез по профилю; I – отражающая граница от подошвы сезонномерзлого слоя; II – отражающая граница от кровли коренных пород; III – гипербола дифракции на трещине; 1 – лед; 2 – рыхлые породы; 3 – высокая льдистость; 4 – элювий коренных пород (щебень); 5 – коренные породы; 6 – зона повышенной трещиноватости; 7 – граница мерзлых пород; 8 – предполагаемое направление фильтрации подземных вод.

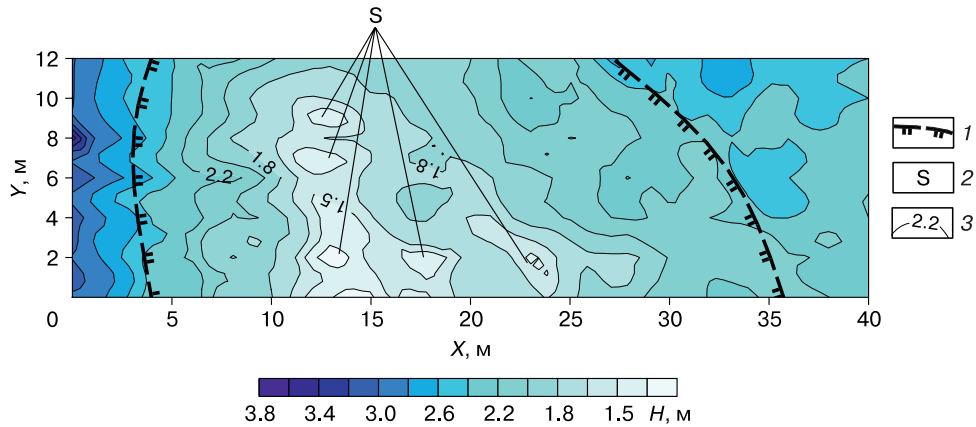


Рис. 5. Карта глубины (H) сезонного промерзания пород в пределах наледи.

1 – граница бугра пучения; 2 – предполагаемое положение источников разгрузки наледных вод в бугре пучения; 3 – изолиния глубины сезонного промерзания пород.

В июле, на момент проведения работ методом электротомографии, наледный бугор полностью растаял, а на его месте образовалось термокарстовое понижение, заполненное водой.

На разрезе УЭС по профилю № 3 отмечается погружение границы геоэлектрических комплексов коренных пород с разным удельным электрическим сопротивлением (рис. 6). При этом однозначно интерпретировать границу между рыхлыми четвертичными отложениями и палеозойским основанием не представляется возможным по следующим причинам. Во-первых, из-за близких значений УЭС мерзлых глинистых четвертичных отложений и талых коренных пород. Во-вторых, из-за неравномерного УЭС подземных вод – низкое у вод солончаков (5.5 Ом·м) и повышенное (16.7 Ом·м) у глубинных вод. В-третьих, из-за на-

личия элювия в кровле коренных пород, УЭС которого определяется степенью разрушенности, влажностью, температурой и минерализацией поровой воды и может быть близко по значениям сопротивлений к четвертичным отложениям. На близкое к поверхности залегание элювия коренных пород в интервале пикетов 140–220 м указывают такие криогенные формы микрорельефа, как многочисленные следы морозной сортировки в виде каменных пятен, состоящих из крупного щебня (150–300 мм) и валунов.

УЭС пород на разрезе по профилю № 3 изменяется от первых десятков ом-метров в приповерхностной обводненной и засоленной части разреза до 6000–13 000 Ом·м у сильнольдистых пород на участке образования гидролакколита и наледного бугра. Выделить четкие границы мерз-

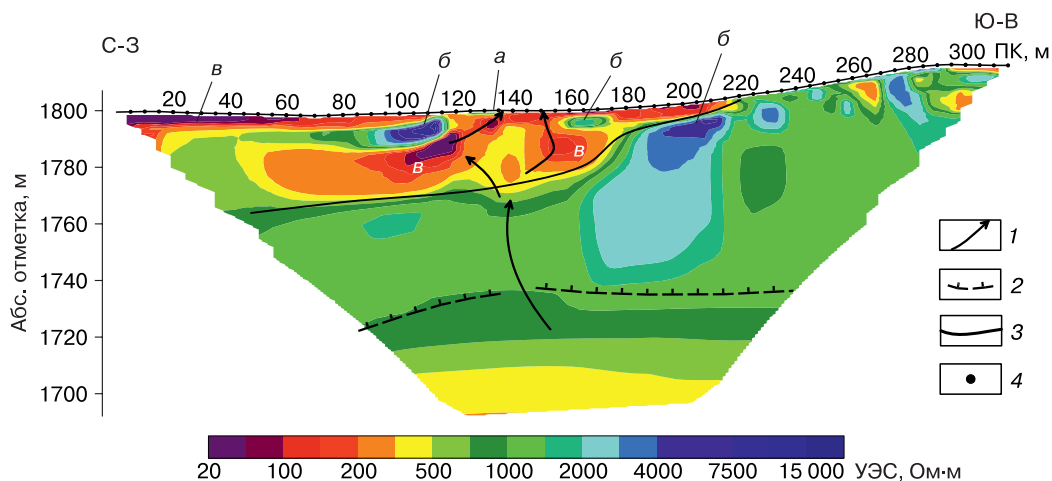


Рис. 6. Геоэлектрический разрез по профилю № 3 по результатам 2D-инверсии.

a – место образования бугра пучения; b – сильнольдистые породы; $в$ – обводненные породы; 1 – предполагаемое направление движения подземных вод; 2 – подошва многолетнемерзлых пород с учетом априорной информации; 3 – предполагаемая подошва талика; 4 – расположение электродов.

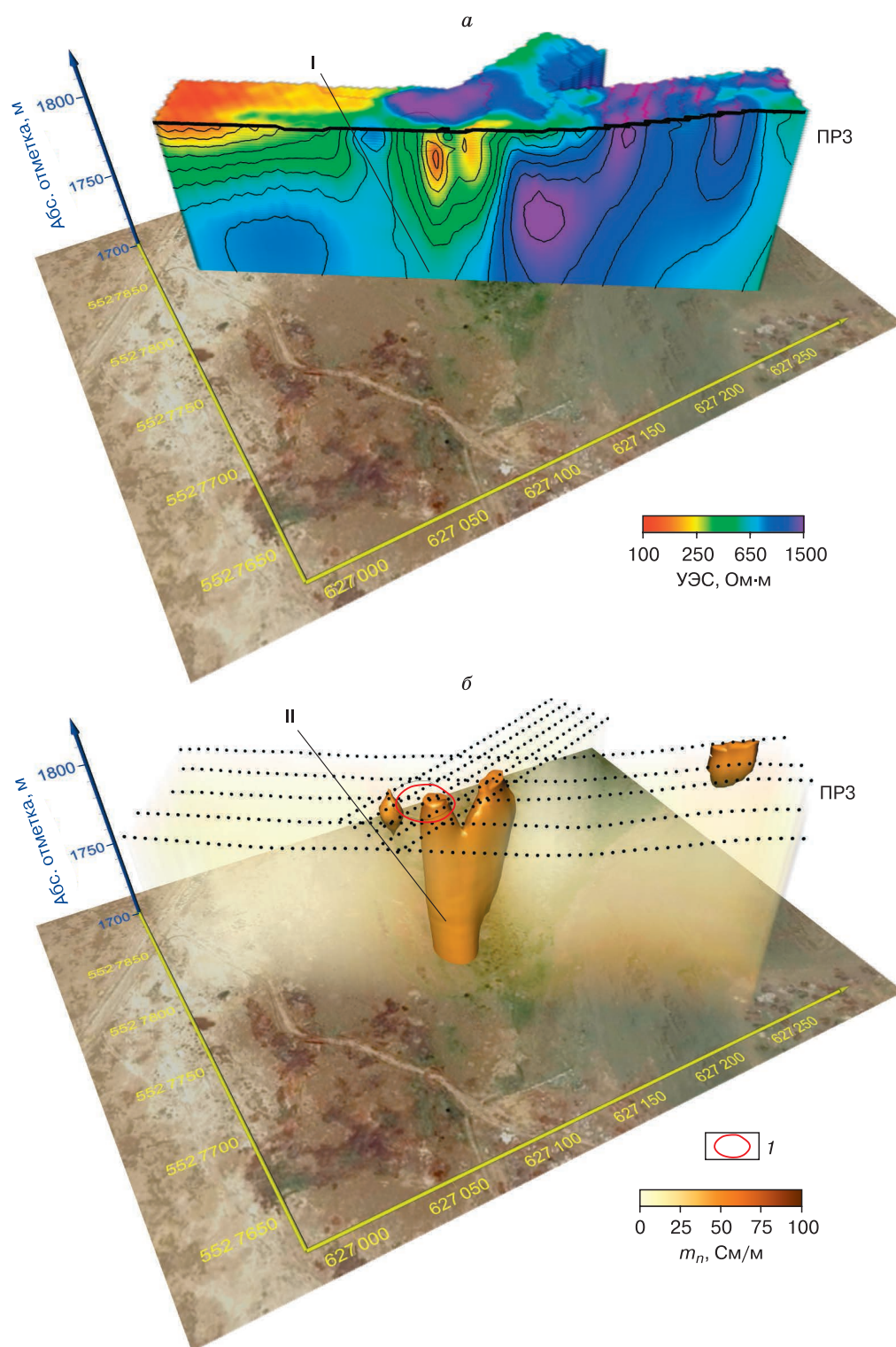


Рис. 7. Объемное распределение удельного электрического сопротивления (а) и заряжаемости m_n (б) на участке исследований по результатам 3D-инверсии.

1 – участок образования бугра пучения; I – аномалия пониженного УЭС от вертикального канала фильтрации подземных вод, питающих наледь; II – аномалия нормированной заряжаемости, изоповерхность 50 См/см.

лых и талых пород в верхней части разреза затруднительно из-за их неравномерной засоленности и разного литологического состава. Можно лишь с уверенностью говорить о том, что области разреза с очень низким сопротивлением соответствуют талым породам, насыщенным минерализованными поровыми растворами, а локальные высокоомные аномалии связаны с сильнольдистыми породами.

Предполагаемые коренные породы до глубины 65–70 м имеют УЭС около 1000 Ом·м с локальными аномалиями до 2500–5000 Ом·м. На глубине более 70 м их сопротивление уменьшается до 400 Ом·м. Согласно априорной информации, подошва ММП в этом районе залегает на глубине около 65 м [Мерзлотно-гидрогеологическая карта..., 1977]. Таким образом, градиентная граница между высокоомными и относительно низкоомными породами на глубине 65–70 м интерпретируется как подошва ММП.

На разрезах УЭС по результатам 2D-инверсии не очевидно наличие вертикального канала фильтрации подземных вод из глубины к месту разгрузки. Это связано с тем, что канал фильтрации – трехмерная структура и ее выделение возможно только по результатам трехмерной инверсии.

На трехмерной геоэлектрической модели (рис. 7, а), построенной по результатам 3D-инверсии, под местом образования гидролакколита и наледного бугра выделяется вертикальная область пониженных значений УЭС 50–300 Ом·м на фоне пород с сопротивлением 500–1500 Ом·м. Мы считаем, что эта аномалия вызвана вертикальным

каналом фильтрации подземных вод к области разгрузки на поверхности. Подобные трубообразные аномалии низкого УЭС, связанные с каналами фильтрации подземных вод, были выделены ранее на участках формирования термосуффозионных воронок [Оленченко и др., 2017] и наледных бугров [Оленченко и др., 2024].

Объемная модель распределения нормированной заряжаемости m_n (см. рис. 7, б) нагляднее демонстрирует структуру вертикального канала фильтрации. По изоповерхности 50 См/м оконтуриваются основной вертикальный канал, над которым зимой формируется гидролакколит и наледный бугор, а также второстепенный канал, расположенный ближе к подножию горы Мишельдык. В летний период разгрузка подземных вод из второстепенного канала происходит в виде источников (ключей), над которыми зимой формируется наледь.

На карте распределения УЭС по глубине 20 м, представляющей собой горизонтальный срез 3D-модели (рис. 8, а), аномалиями низкого сопротивления хорошо проявлена группа каналов восходящей фильтрации подземных вод. При этом вариации высокого сопротивления, по-видимому, отражают изменение литологического состава и температуры мерзлых пород. Один из каналов (центральный) является основным, а другие – второстепенными. Здесь на поверхности наблюдается групповая разгрузка на макроуровне.

На карте распределения нормированной заряжаемости (см. рис. 8, б) на нулевом фоне выде-

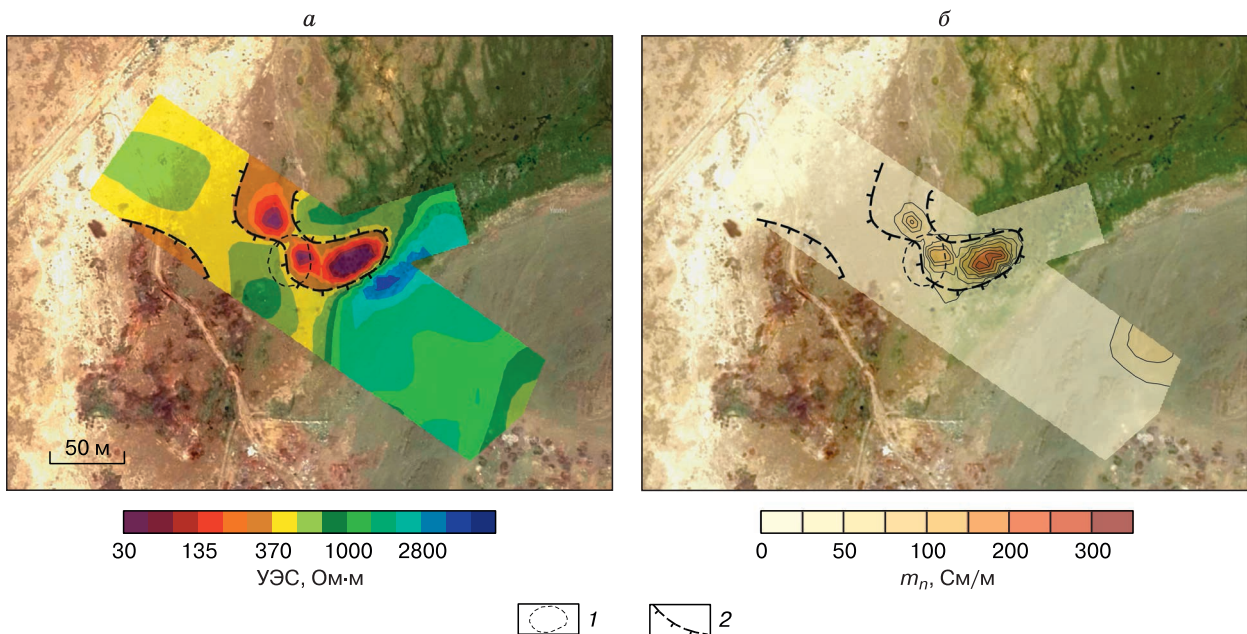


Рис. 8. Карты распределения удельного электрического сопротивления (а) и нормированной заряжаемости m_n (б) на глубине 20 м.

1 – место образования гидролакколита и наледного бугра; 2 – предполагаемые границы многолетнемерзлых пород.

ляются только аномалии от каналов фильтрации подземных вод, что удобно использовать для локализации источников наледных вод.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Участок образования сезонного инъекционного бугра пучения, наледного бугра и наледи у г. Мишельдык представляет собой классическую открытую систему, когда сезонное промерзание пород происходит с подтоком воды [Бойцов, 2011]. Согласно классификации таликов [Романовский, 1983], приток воды происходит из гидрогеогенного субаэрального напорно-фильтрационного сквозного талика. Выводы о генезисе наледи, формирующейся у г. Мишельдык в Чуйской впадине, и предположение о строении источников подземных вод, питающих наледь, можно сделать и на основании геоморфологического анализа, сведений о геокриологическом строении территории. Однако “разглядеть” детали строения каналов фильтрации и разгрузки подземных вод можно только с помощью геофизических методов.

Мы показали, что по данным площадной георадиолокации субгляциальная разгрузка подземных вод на участке образования наледного бугра осуществляется через групповой источник, который проявляется в виде нескольких локальных зон с минимальной глубиной сезонного промерзания. Аналогичные геофизические признаки каналов субгляциальной разгрузки подземных вод наблюдались на наледи р. Анмангында в Магаданской области [Оленченко и др., 2023]. Подобные аномалии на радарограммах установлены на наледи Купарук (Kuparuk) на Аляске [Terry et al., 2020]. Однако эти аномалии были выявлены на отдельных профилях и не оконтурены в плане, поэтому никак не проинтерпретированы.

В современной литературе, посвященной изучению наледей с помощью геофизических методов, практически не уделяется внимание задаче выделения каналов фильтрации подземных вод, питающих наледь. Основной акцент в интерпретации делается на разделение мерзлых и талых пород (таликов) в разрезе, а пути движения подземных вод изображаются на моделях разрезов интуитивно [You et al., 2016; Liu et al., 2021; Walther et al., 2021]. Даже концептуальные модели повышения давления грунтовых вод в подрусловом талике строятся на основе общих представлений о строении этого талика, а не на результатах площадных геофизических исследований [Liu et al., 2021]. Тем не менее современные технологии позволяют получать объемное распределение электрических параметров геологической среды, по которому можно судить о ее внутреннем строении.

По нашим данным, восходящий канал фильтрации подземных вод проявляется на фоне вертикальной аномалии пониженного сопротивления

четкой трубообразной аномалией нормированной заряжаемости m_n (см. рис. 7, б), которая разветвляется к поверхности, и разгрузка подземных вод происходит в нескольких местах, образуя групповой источник на макроуровне. И если в объемной модели распределения УЭС низкими значениями сопротивления выделяются и обводненные четвертичные отложения, и обводненные трещиноватые палеозойские породы, то аномалия m_n оконтуривает только области фильтрации воды. Это различие в распределении полей особенно хорошо видно на горизонтальных срезах объемных моделей УЭС и нормированной заряжаемости (см. рис. 8).

Анализ литературы показывает, что на многих гидротехнических сооружениях и полигонах бытовых отходов, где изучается распределение УЭС и поляризуемости, в областях фильтрации грунтовых вод отмечаются аномалии повышенной поляризуемости или нормированной заряжаемости [Viezzoli et al., 2006; Ustra et al., 2012; Abdulsamad et al., 2019; Fedorova, Gorshkov, 2023]. Некоторые авторы увязывают аномалии поляризуемости и нормированной заряжаемости в местах фильтрации грунтовых вод от свалок или хвостохранилищ с повышенным содержанием глины, органики и металлов в заполнителе порового пространства [Viezzoli et al., 2006; Abdulsamad et al., 2019; Fedorova, Gorshkov, 2023]. В тех случаях, когда содержание глины в порах мало, повышенная нормированная заряжаемость горных пород объясняется увеличением солености поровой воды [Elis, 2016].

Однако мы считаем, что в восходящем канале фильтрации не может быть высокой глинистости вследствие выноса потоком воды мелких частиц из трещин в коренных породах и из пор в рыхлых отложениях. Минерализация воды здесь также относительно невысокая, а минералы с электронной проводимостью полностью отсутствуют.

Другая возможная причина возникновения аномалий нормированной заряжаемости в области канала фильтрации заключается в том, что при выносе мелких частиц уменьшается гидродинамическая извилистость пор. Согласно [Дахнов, 1985], УЭС породы (ρ_r) пропорционально квадрату электрической извилистости пор, которая в первом приближении равна гидродинамической извилистости:

$$\rho_r = \frac{\tau_{el}^2}{\phi} \rho_f,$$

где τ_{el} – электрическая извилистость, равная отношению длины капилляра к кратчайшему расстоянию между соответствующими гранями куба породы; ϕ – коэффициент пористости, безразмерный; ρ_f – удельное электрическое сопротивление поровой воды, Ом·м.

Таким образом, нормированная заряжаемость m_n обратно пропорциональна квадрату электрической извилистости пор и УЭС поровой воды:

$$m_n = \frac{m}{\rho_r} = \frac{m\phi}{\tau_{cl}\rho_f},$$

где m – заряжаемость, мВ/В.

Из этой формулы следует, что при постоянной минерализации подземных вод, слабо меняющейся пористости и поляризуемости существенное влияние на нормированную заряжаемость m_n оказывает электрическая извилистость пор, примерно равная гидродинамической извилистости. Следовательно, параметр m_n является хорошим инструментом для выявления каналов фильтрации подземных вод и может быть использован для решения широкого круга задач, в том числе для локализации источников наледных вод гидрогеогенных наледей.

Одним из активных способов борьбы с гидрогеогенными наледями может быть перехват подземных вод в канале фильтрации с помощью скважины и организация стока через отводные трубы. В этом случае построение трехмерной геоэлектрической модели участка разгрузки наледных вод и оконтуривание канала восходящей фильтрации позволяет точно спланировать положение такой скважины для перехвата подземных вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Участок разгрузки подземных вод и образования наледи у подножия горы Мишельдык является типичным для Чуйской впадины Горного Алтая и классическим примером гидрогеогенной наледи. На месте разгрузки подземных вод зимой образуется сезонный бугор пучения – гидролакколит, на котором, в свою очередь, растет наледный бугор.

С помощью георадиолокации 400 МГц и бурения установлено, что максимальная толщина льда на вершине наледного бугра на момент исследований не превышала 0.45 м, следовательно, положительная форма рельефа сформирована в основном гидролакколитом.

Результаты площадной георадиолокации дали возможность оценить глубину сезонного промерзания, которая составила 1.8–2.7 м, и выявить anomalно малые (1.3 м) ее значения над каналами разгрузки подземных вод. Несколько таких аномалий свидетельствуют о групповом выходе подземных вод в зоне разгрузки.

Методом БИЭП показано, что под бугром пучения на геоэлектрическом разрезе присутствует вертикальная аномалия пониженного сопротивления, интерпретируемая как гидрогеогенный талик в разломной зоне, по которому разгружаются подземные воды.

Интерпретация результатов двумерной электротомографии затруднена тем, что в верхней час-

ти разреза присутствуют породы разного литологического состава, льдистости и засоленности. Это осложняет однозначное выделение многолетнемерзлых пород. С уверенностью можно выделить лишь участки сильнольдистых или обводненных пород. По градиентной границе уменьшения УЭС пород на глубине 65–70 м выделена предполагаемая подошва многолетнемерзлых пород, положение которой согласуется с данными бурения в этом районе.

Трехмерная инверсия данных ЭТ–ВП показала, что под местом образования гидролакколита прослеживается на всю глубину зондирования (до 100 м) вертикальная структура пониженного сопротивления, интерпретируемая как канал разгрузки подземных вод в разломной зоне. Еще отчетливее этот канал и его ветвление в верхней части разреза оконтуриваются аномалией нормированной заряжаемости.

Установлено, что параметр “нормированная заряжаемость” обратно пропорционален квадрату электрической извилистости пор, которая примерно равна гидродинамической извилистости. При фильтрации воды в горных породах происходит суффозионный вынос мелких частиц и спрямление токовых путей. Это объясняет интенсивные аномалии нормированной заряжаемости в местах фильтрации грунтовых и подземных вод, в том числе из гидротехнических сооружений и свалок, наблюдаемые ранее другими исследователями.

Выявление каналов фильтрации в области питания наледей даст возможность планировать инженерные мероприятия по перехвату подземных вод и снижению наледной опасности.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) “Геоэлектрические и электромагнитные методы исследования верхней части земной коры: теория, модели, эксперимент” (FWZZ-2022-0024).

Литература

- Алексеев В.Р.** Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2021, 302 с.
- Баишев Н.Е., Шепелев В.В., Гагарин Л.А.** О закономерностях распространения наледей на федеральной автодороге А-360 “Лена” по данным мультиспектральных космических снимков // Природ. ресурсы Арктики и Субарктики, 2021, т. 26, № 1, с. 60–69.
- Бойцов А. В.** Геокриология и подземные воды криолитозоны. Тюмень, ТюмГНГУ, 2011, 178 с.
- Верхотуров А.Г.** Многолетняя динамика наледей Центрального и Южного Забайкалья // Подземная гидросфера: Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием) (Екатеринбург, 21–28 июня 2024 г.). Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2024, с. 19–24.

- Владов М.Л.** Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений / М.Л. Владов, М.С. Судакова. М., Изд-во "Хорошее", 2017, 240 с.
- Геологический словарь** в 2-х томах / Под ред. К.Н. Паффенгольца и др. М., Недра, 1978, 455 с.
- Дахнов В.Н.** Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. 2-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1985, 310 с.
- Деев Е.В., Неведрова Н.Н., Зольников И.Д. и др.** Геоэлектрические исследования отложений Чуйской котловины (Горный Алтай) // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 1, с. 120–139.
- Достовалова М.С., Шитов А.В.** Влияние метеорологических характеристик и геодинамической активности на режим образования гидрогенных наледей Горного Алтая // ГеоРиск, 2011, № 4, с. 36–43.
- Зольников И.Д., Деев Е.В., Лямина В.А.** Новые данные о четвертичном морфолитоогенезе в Чуйской котловине (Горный Алтай) // Геология и геофизика, 2010, т. 51, № 4, с. 437–449.
- Калганов А.С., Оленченко В.В., Осипова П.С.** Оценка влагонасыщенности рудной массы и поиск нарушений гидроизоляции при кучном выщелачивании золота // EAGE: Инженерная и рудная геофизика 2022: Сб. материалов 18-й науч.-практ. конф. и выставки (Геленджик, Россия, 5–8 сент. 2022 г.). М., ООО "ЕАГЕ Геомодель", 2022, с. 293–301.
- Кожевников Н.О., Никифоров С.П.** Изучение современных и погребенных речных долин Ленского района электроразведочными методами // Геоэкология, 1997, № 2, с. 100–110.
- Мерзлотно-гидрогеологическая карта** м-ба 1:200 000. Новосибирск, Отдел фондов Зап.-Сиб. геол. управления; инв. № 18195, 1977, 240 с.
- Оленченко В.В., Гагарин Л.А., Христофоров И.И. и др.** Строение участка развития термосуффузионных процессов в пределах бестяжской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 5, с. 16–26.
- Оленченко В.В., Макарьева О.М., Землянскова А.А. и др.** Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) // Геодинамика и тектонофизика, 2023, т. 14, № 3, 0702.
- Оленченко В.В., Макарьева О.М., Землянскова А.А. и др.** Геофизические условия формирования гигантской наледи подземных вод р. Анмангында (Магаданская область) по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика, 2024, т. 15, № 2, 0753.
- Потапов В.В., Макарьева О.М., Оленченко В.В.** Геоэлектрическое строение разреза на Анмангындинской наледи (Магаданская область) по данным метода ЗСБ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVIII Междунар. науч. конф. (Новосибирск, 18–20 мая 2022 г.). Новосибирск, ИНГТ СО РАН, 2022, т. 2, № 3, с. 59–65.
- Романовский Н.Н.** Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 231 с.
- Свод правил.** СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 / В.П. Петрухин, И.В. Колыбин, В.Г. Федоровский и др. М., ФАУ "ФЦС", 2012, 65 с.
- Черных В.Н.** Распространение и динамика наледей в Селенгинском среднегорье // Изв. Рус. геогр. о-ва, 2025, т. 156, № 2, с. 155–168.
- Шац М.М.** Геокриологические условия Алтае-Саянской горной страны. Новосибирск, Наука, 1978, 103 с.
- Шестернев Д.М., Верхотуров А.Г.** Воздействие наледей на инженерные сооружения // Вестн. Забайкал. гос. ун-та, 2016, т. 22, № 10, с. 30–40.
- Шитов А.В.** Ландшафтное планирование как программа эколого-экономического развития Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай) // Степи Северной Евразии: Материалы VIII Междунар. симп. (Оренбург, 10–13 сент. 2018 г.). Оренбург, Ин-т степи УрО РАН, 2018, с. 1131–1134.
- Abdulsamad F., Revil A., Ahmed A.S. et al.** Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in embankments // Eng. Geology, 2019, vol. 254, p. 89–101.
- Arcone S.A., Chacho E.F., Delaney A.J.** Seasonal structure of taliks beneath arctic streams determined with ground-penetrating radar // Proc. of the Seventh Int. Permafrost Conf. Ottawa ON, Canada. Int. Permafr. Association, Can. Nat. Committee, 1998, p. 19–24.
- Elis V.R., Ustra A.T., Hidalgo-Gato M.C. et al.** Application of induced polarization and resistivity to the environmental investigation of an old waste disposal area // Environ. Earth Sci., 2016, vol. 75, p. 1–13.
- Fedorova O.I., Gorshkov V.Y.** Geoelectric monitoring of earthen hydraulic structure state by resistivity and induced polarization methods: mine water settling pond dam case study // Russ. J. Earth Sci., 2023, vol. 23, No. 4, p. 4011.
- Lesmes D.P., Frye K.M.** Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone // J. Geophys. Res.: Solid Earth, 2001, vol. 106, No. B3, p. 4079–4090.
- Liu W., Fortier R., Molson J., Lemieux J.M.** A conceptual model for talik dynamics and icing formation in a river floodplain in the continuous permafrost zone at Salluit, Nunavik (Quebec), Canada // Permafr. Periglac. Process., 2021, vol. 32, No. 3, p. 468–483.
- O'Neill H.B., Roy-Léveillé P., Lebedeva L., Ling F.** Recent advances (2010–2019) in the study of taliks // Permafr. Periglac. Process., 2020, vol. 31, No. 3, p. 346–357.
- Slater L., Lesmes D.P.** Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments // Water Resour. Res., 2002, vol. 38, No. 10, p. 31–1–31–13.
- Terry N., Grunewald E., Briggs M. et al.** Seasonal subsurface thaw dynamics of an aufeis feature inferred from geophysical methods // J. Geophys. Res.: Earth Surface, 2020, vol. 125, No. 3, e2019JF005345.
- Turcotte B., Dubnick A., McKillop R.** Icing and aufeis in cold regions II: Consequences and mitigation // Can. J. Civil Eng., 2023, vol. 51, No. 2, p. 125–139.
- Viezzoli A., Cull J.P., Massie D.** Mapping fly-ash water pond leakage with TEM and IP data at Loy Yang coal-mine (Australia) // Near Surface Geophys., 2006, vol. 4, No. 5, p. 305–311.
- Ustra A.T., Elis V.R., Mondelli G. et al.** Case study: A 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil // Environ. Earth Sci., 2012, vol. 66, p. 763–772.
- Walther M., Batsaikhan V., Dashtseren A. et al.** The formation of aufeis and its impact on infrastructure around Ulaanbaatar, north-central Mongolia // Exp. Biol. Resour. Mongolia, 2021, vol. 14, p. 385–398.
- Walvoord M.A., Voss C.I., Ebel B.A., Minsley B.J.** Development of perennial thaw zones in boreal hillslopes enhances potential mobilization of permafrost carbon // Environ. Res. Lett., 2019, vol. 14, No. 1, p. 015003.

You Y., Yang M., Yu Q. et al. Investigation of an icing near a tower foundation along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line // *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2016, vol. 121, p. 250–257.

References

- Alekseev V.R. Atlas gigantsskikh naledei-tarynov Severo-Vostoka Rossii [Atlas of Giant Aueis-Taryns of the Northeast of Russia]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2021, 302 p. (in Russian).
- Baishev N.E., Shepyolov V.V., Gagarin L.A. On the regularities of aueis distribution on the federal highway A-360 “Lena” according to multispectral satellite images. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki* [Natural Resources of the Arctic and Subarctic], 2021, vol. 26, No. 1, p. 60–69 (in Russian).
- Boytsov A.V. *Geokriologiya i podzemnye vody kriolitozony* [Geocryology and Underground Waters of the Cryolithozone]. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University, 2011, 178 p. (in Russian).
- Verkhoturov A.G. Long-term dynamics of aueis in Central and Southern Transbaikalia. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vserossiyskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii* [Underground Hydrosphere: Proceedings of the All-Russian Meeting on Underground Waters of the East of Russia]. Yekaterinburg, Institute of Mining UB RAS, 2024, p. 19–24 (in Russian).
- Vladov M.L., Sudakova M.S. *Georadiolokatsiya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravleniy* [Ground Penetrating Radar. From Physical Foundations to Advanced Directions]. Moscow, Izd-vo “Khoroshee”, 2017, 240 p. (in Russian).
- Geologicheskii slovar v 2-kh tomakh* [Geological Dictionary in 2 volumes]. K.N. Paffengoltz et al. (eds.). Moscow, Nedra, 1978, 455 p. (in Russian).
- Dakhnov V.N. *Geofizicheskie metody opredeleniya kollektorskiikh svoystv i neftegazonasyshcheniya gornykh porod* [Geophysical Methods for Determining Reservoir Properties and Oil-Gas Saturation of Rocks]. 2nd ed. Moscow, Nedra, 1985, 310 p. (in Russian).
- Deev E.V., Nevedrova N.N., Zolnikov I.D. et al. Geoelectrical studies of the Chuya Basin deposits (Gorny Altai). *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2012, vol. 53, No. 1, p. 120–139 (in Russian).
- Dostovalova M.S., Shitov A.V. Influence of meteorological characteristics and geodynamic activity on the regime of hydrogenic aueis formation in the Altai Mountains. *Georisk* [Georisk], 2011, No. 4, p. 36–43 (in Russian).
- Zolnikov I.D., Deev E.V., Lyamina V.A. New data on Quaternary morpholithogenesis in the Chuya Basin (Gorny Altai). *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2010, vol. 51, No. 4, p. 437–449 (in Russian).
- Kalganov A.S., Olenchenko V.V., Osipova P.S. Assessment of ore moisture saturation and detection of hydraulic insulation breaches in heap leaching of gold. In: *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2022: Sbornik materialov 18-y nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki* [Engineering and Ore Geophysics 2022: Proc. of the 18th Scientific and Practical Conf. and Exhibition] (Gelendzhik, Russia, September 5–8, 2022). Moscow, EAGE Geomodel LLC, 2022, p. 293–301 (in Russian).
- Kozhevnikov N.O., Nikiforov S.P. Study of modern and buried river valleys of the Lensky District by electrical prospecting methods. *Geoekologiya* [Geoecology], 1997, No. 2, p. 100–110 (in Russian).
- Merzlotno-gidrogeologicheskaya karta m-ba 1:200 000 [Permafrost-Hydrogeological Map, scale 1:200 000]. Novosibirsk, West Siberian Geological Administration, 1977, 240 p. (in Russian).
- Olenchenko V.V., Gagarin L.A., Khristoforov I.I. et al. The structure of a site with thermo-suffosion processes within Bestyakh terrace of the Lena River, according to geophysical data. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 5, p. 14–23.
- Olenchenko V.V., Makaryeva O.M., Zemlyanskova A.A. et al. *Geofizicheskie priznaki istochnikov gigantskoi naledi na R. Anmangynda (Magadanskaya oblast')* [Geophysical Indicators of the Giant Aueis Sources on the Anmangynda River (Magadan Region)]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and Tectonophysics], 2024, vol. 14, No. 3, Art. 0702 (in Russian).
- Olenchenko V.V., Makaryeva O.M., Zemlyanskova A.A. et al. *Geocryological Conditions of Formation of the Giant Groundwater Aueis of the Anmangynda River (Magadan Region) from Geophysical Data*. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and Tectonophysics], 2024, vol. 15, No. 2, Art. 0753 (in Russian).
- Potapov V.V., Makaryeva O.M., Olenchenko V.V. *Geoelectric structure of the section at the Anmangyndinskaya Aueis (Magadan Region) from TEM Data*. In: *Interespo GEO-Sibir – “Nedropolzovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiskov, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh. Ekonomika. Geoekologiya”*: Materialy XVIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Interexpo GEO-Siberia – “Subsoil Use. Mining. Directions and Technologies for Prospecting, Exploration, and Development of Mineral Deposits. Economics. Geoecology”: Proc. of the XVIII Int. Sci. Conf.] (Novosibirsk, May 18–20, 2022). Novosibirsk, IGM SB RAS, 2022, vol. 2, No. 3, p. 59–65 (in Russian).
- Romanovsky N.N. *Podzemnye vody kriolitozony* [Underground Waters of the Cryolithozone]. Moscow, Moscow University Press, 1983, 231 p. (in Russian).
- Set of Rules SP 116.13330.2012. *Inzhenernaya zashchita territoriy, zdaniy i sooruzheniy ot opasnykh geologicheskikh protsessov* [Engineering Protection of Territories, Buildings, and Structures from Hazardous Geological Processes]. V.P. Petrukhin, I.V. Kolibin, V.G. Fedorovski et al. (eds.). Moscow, FAI “FCS”, 2012, 65 p. (in Russian).
- Chernykh V.N. Distribution and dynamics of aueis in the Selenga Highlands. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Proceedings of the Russian Geographical Society], 2025, vol. 156, No. 2, p. 155–168 (in Russian).
- Shats M.M. *Geokriologicheskie usloviya Altay-Sayanskoy gornoy strany* [Geocryological Conditions of the Altai-Sayan Mountain Country]. Novosibirsk, Nauka, 1978, 103 p. (in Russian).
- Shesternev D.M., Verkhoturov A.G. Impact of aueis on engineering structures. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Transbaikal State University], 2016, vol. 22, No. 10, p. 30–40 (in Russian).
- Shitov A.V. Landscape planning as a program for ecological and economic development of the Chui Intermountain Basin (Republic of Altai). In: *Stepi Severnoy Evrazii: Materialy VIII mezhdunarodnogo simpoziuma* [Steppes of Northern Eurasia: Proceedings of the VIII International Symposium] (Orenburg, September 10–13, 2018). Orenburg, Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018, p. 1131–1134 (in Russian).
- Abdulsamad F., Revil A., Ahmed A.S. et al. Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in bankments. *Eng. Geology*, 2019, vol. 254, p. 89–101.
- Arcone S.A., Chacho E.F., Delaney A.J. Seasonal structure of taliks beneath arctic streams determined with ground-penetrating radar. In: *Proc. of the Seventh Int. Permafrost Conf.* Ottawa, Canada, Int. Permafr. Association, Can. Nat. Committee, 1998, p. 19–24.
- Elis V.R., Ustra A.T., Hidalgo-Gato M.C. et al. Application of induced polarization and resistivity to the environmental inves-

- tigation of an old waste disposal area. *Environ. Earth Sci.*, 2016, vol. 75, p. 1–13.
- Fedorova O.I., Gorshkov V.Y. Geoelectric monitoring of earthen hydraulic structure state by resistivity and induced polarization methods: Mine water settling pond dam case study. *Russ. J. Earth Sci.*, 2023, vol. 23, No. 4, p. 4011.
- Lesmes D.P., Frye K.M. Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2001, vol. 106, No. B3, p. 4079–4090.
- Liu W., Fortier R., Molson J., Lemieux J.M. A conceptual model for talik dynamics and icing formation in a river floodplain in the continuous permafrost zone at Salluit, Nunavik (Quebec), Canada. *Permafr. Periglac. Process.*, 2021, vol. 32, No. 3, p. 468–483.
- O'Neill H.B., Roy-Léveillé P., Lebedeva L., Ling F. Recent advances (2010–2019) in the study of taliks. *Permafr. Periglac. Process.*, 2020, vol. 31, No. 3, p. 346–357.
- Slater L., Lesmes D.P. Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments. *Water Resour. Res.*, 2002, vol. 38, No. 10, p. 31–1–31–13.
- Terry N., Grunewald E., Briggs M. et al. Seasonal subsurface thaw dynamics of an aufeis feature inferred from geophysical methods. *J. Geophys. Res.: Earth Surface*, 2020, vol. 125, No. 3, e2019JF005345.
- Turcotte B., Dubnick A., McKillop R. Icing and aufeis in cold regions II: Consequences and mitigation. *Can. J. Civil Eng.*, 2023, vol. 51, No. 2, p. 125–139.
- Viezzoli A., Cull J.P., Massie D. Mapping fly-ash water pond leakage with TEM and IP data at Loy Yang coal-mine (Australia). *Near Surface Geophys.*, 2006, vol. 4, No. 5, p. 305–311.
- Ustra A.T., Elis V.R., Mondelli G. et al. Case study: A 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil. *Environ. Earth Sci.*, 2012, vol. 66, p. 763–772.
- Walther M., Batsaikhan V., Dashtseren A. et al. The formation of aufeis and its impact on infrastructure around Ulaanbaatar, north-central Mongolia. *Exp. Biol. Resour. Mongolia*, 2021, vol. 14, p. 385–398.
- Walvoord M.A., Voss C.I., Ebel B.A., Minsley B.J. Development of perennial thaw zones in boreal hillslopes enhances potential mobilization of permafrost carbon. *Environ. Res. Lett.*, 2019, vol. 14, No. 1, p. 015003.
- You Y., Yang M., Yu Q. et al. Investigation of an icing near a tower foundation along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2016, vol. 121, p. 250–257.

*Поступила в редакцию 4 апреля 2025 г.,
после доработки – 23 июня 2025 г.,
принята к публикации 1 сентября 2025 г.*

ХРОНИКА

УДК 551.34

DOI: 10.15372/KZ20250506

EDN: GTFAZR

ИГОРЬ ВЛАДИМИРОВИЧ КЛИМОВСКИЙ
(19.08.1934 – 08.08.2025)**М.Н. Железняк, В.В. Шепелев, О.И. Алексеева*, И.И. Сыромятников***Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия***Автор для контакта; e-mail: o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru*

8 августа 2025 г. на 91-м году жизни скончался Игорь Владимирович Климовский – старший научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, кандидат географических наук, заслуженный деятель народного хозяйства Республики Саха (Якутия), ветеран труда, заслуженный ветеран Сибирского отделения Российской академии наук. Игорь Владимирович останется в памяти как замечательный ученый-мерзлотовед, искренне преданный геокриологической науке, неутомимый исследователь и великолепный полевик.

Ключевые слова: криолитозона, мерзлотоведение, природные процессы и явления, экспедиционные исследования, ученый-мерзлотовед.

Ссылка для цитирования: Железняк М.Н., Шепелев В.В., Алексеева О.И., Сыромятников И.И. Игорь Владимирович Климовский (19.08.1934 – 08.08.2025) // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 5, с. 58–60. DOI: 10.15372/KZ20250506. EDN: GTFAZR.

IGOR VLADIMIROVICH KLIMOVSKY
(19.08.1934 – 08.08.2025)**M.N. Zheleznyak, V.V. Shepelev, O.I. Alekseeva*, I.I. Syromyatnikov***Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia***Corresponding author; e-mail: o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru*

On August 8, 2025, Igor Vladimirovich Klimovsky, a senior researcher at the Melnikov Permafrost Institute, Candidate of Geographical Sciences, Honored Worker of the Economy of the Republic of Sakha (Yakutia), Veteran of Labor, and Honored Veteran of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, passed away at the age of 90. He will be remembered as a remarkable permafrost researcher committed to geocryological science, a tireless explorer, and an excellent field worker.

Keywords: permafrost, geocryology, natural processes and phenomena, field research, permafrost scientist.



И.В. Климовский родился 19 августа 1934 г. в городе Якутске в семье служащих. В 1953 г., окончив среднюю школу с серебряной медалью, он по конкурсному собеседованию был зачислен на географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Избрав кафедру северных и полярных стран этого факультета, окончил его в 1958 г., защитив дипломную работу по теме “Геоморфология Южного Хара-Улаха (Северное Верхоянье)”. По приглашению Сибирского отделения АН СССР он прибыл в г. Якутск в распоряжение Якутской научно-исследовательской мерзлотной станции (ныне Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН). Здесь он работал до настоящего времени, пройдя путь от лаборанта до ведущего научного сотрудника. И.В. Климовский длительное время возглавлял лабораторию региональной геокриологии и отдел региональных исследований института. Последнее время работал в должности старшего научного сотрудника лаборатории общей геокриологии (рис. 1).

В 1968 г. Игорь Владимирович защитил кандидатскую диссертацию по теме “Криогенные и посткриогенные образования Северного Забайкалья”. Его научная деятельность была связана с проблемами региональной геокриологии. Значительную часть своего творческого потенциала он использовал на организацию, руководство и проведение многочисленных экспедиционных исследований, в том числе круглогодичных тематических научных стационаров. Проводимые им исследования всегда носили комплексный характер, что позволило отрабатывать методические прие-

мы геокриологической съемки и картирования отдельных параметров криолитозоны.

И.В. Климовский со своими коллегами охватил полевыми исследованиями многие районы не только родной Якутии, но и сопредельных с ней регионов (Средняя Сибирь, Прибайкалье, горы Забайкалья и Приамурья) (рис. 2). Он организовывал и осуществлял руководство такими масштабными комплексными экспедициями института, как Удоканская и БАМ (западный участок и якутская часть). Им были выявлены мерзлотные особенности основных природных зон Якутии, а также пустынь Внутренней Монголии. Результаты его исследований нашли отражение в более чем 150 опубликованных научных трудах, в том числе в 10 уникальных монографиях и изданных геокриологических картах [Железняк и др., 2025].

И.В. Климовский также уделял большое внимание изучению истории становления геокриологической науки, популяризаторской деятельности, писал очерки, брошюры и книги о выдающихся ученых-мерзлотоведах. Так, в 2008 г. в Новосибирске в серии “Наука Сибири в лицах” была опубликована подготовленная И.В. Климовским фундаментальная монография о жизни и деятельности основателя Института мерзлотоведения СО РАН академика Павла Ивановича Мельникова [Климовский, 2008].

В 2019 г. была издана книга И.В. Климовского “Издадека долго...” [Климовский, 2019]. В ней с высоты прожитых лет автор охарактеризовал не только основные этапы своей творческой жизни, но и историю становления и развития родного для него Института мерзлотоведения СО РАН. По



Рис. 1. Климовский И.В. в рабочем кабинете при составлении геокриологической карты (Якутск, 1983 г.).



Рис. 2. Полевой отряд в районах в Западной Якутии (1993 г.).

Слева направо: к.г.н. Климовский И.В., к.г.-м.н. Готовцев С.П., д.г.-м.н. Алексеев С.В.

мнению многих читателей, издание этой книги явилось важным событием для отечественной гео-криологической науки.

И.В. Климовский принимал участие в организации ряда международных научных мероприятий. Был в числе делегатов пяти международных конференций по мерзлотоведению (СССР (Якутия), Канада, США, Норвегия, Китай). Содействовал установлению научных контактов со специалистами из Монголии, Китая, Чехословакии. По его инициативе были составлены программы совместных исследований с учеными Германии, где он прочитал курс лекций по мерзлотоведению студентам ряда вузов этой страны.

В течение 25 лет И.В. Климовский вел преподавательскую работу на биолого-географическом и геологическом факультетах Якутского государственного университета (ЯГУ). Он входил в первый состав педагогов созданной в 1978 г. в ЯГУ кафедры мерзлотоведения, а позднее был избран ее доцентом. Многие его ученики стали видными учеными и специалистами.

Успехи И.В. Климовского в развитии научных исследований, в проведении научно-организационной, педагогической, общественной и научно-популяризаторской деятельности отмечены многими медалями и почетными нагрудными знаками.

Игорь Владимирович останется в нашей памяти как замечательный ученый-мерзлотовед, искренне преданный науке, неутомимый исследователь и великолепный полевик.

Литература

Железняк М.Н., Шепелев В.В., Алексеева О.И. К 90-летию Климовского Игоря Владимировича // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 1, с. 74–76.

Климовский И.В. Академик Павел Иванович Мельников / Отв. ред. Р.В. Чжан, В.В. Шепелев. Новосибирск, Акад. изд-во “Geo”, 2008, 306 с.

Климовский И.В. Издалека долго... / Отв. ред. В.В. Шепелев. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2019, 362 с.

References

Zheleznyak M.N., Shepelev V.V., Alekseeva O.I. On the 90th anniversary of Klimovsky Igor Vladimirovich. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2025, vol. XXIX, No. 1, p. 74–76 (in Russian).

Klimovsky I.V. Akademik Pavel Ivanovich Mel'nikov [Academician Pavel Ivanovich Melnikov]. R.V. Zhang, V.V. Shepelev (eds.). Novosibirsk, Academic Publishing House “Geo”, 2008, 306 p. (in Russian).

Klimovsky I.V. Izdaleka dolgo... [From a long way away, for a long time...]. V.V. Shepelev (ed.). Yakutsk, IMZ SO RAN, 2019, 362 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 28 августа 2025 г.,
принята к публикации 3 сентября 2025 г.*