Двадцать четвертая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

О некоторых проявлениях криогенеза в сухостепной зоне (на примере Кулундинской степи)



А.Н. Романов[1], В.В. Тихонов [1, 2] , Д.А. Романов[1, 3]
[1]Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия
[2]Институт космических исследований РАН
[3]Новосибирский государственный университет

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Климатические и гидрологические изменения, вызванные глобальным потеплением и происходящие в разных регионах Земного шара с разной интенсивностью, особенно заметны в Арктике и Субарктике.

Арктический макрорегион представляет собой динамичную систему, где атмосферные и океанические процессы взаимодействуют в различных пространственных и временных масштабах, влияя на глобальные климатические системы (Mokhov, Smirnov, 2026).

Хорошо известно влияние Арктики на климат средних широт (Гудкович и др., 2009; Bokuchava, Semenov, 2021). Например, сокращение площади морского льда в Арктике оказывает влияние на региональную климатическую динамику индийского летнего муссона (Kulkarni et al., 2025). Исследованы телесвязи между Арктическими территориями (акватория Карского моря), пустыней Аралкум, Северным и Западным Аралом (Callaghan et al. 2026).

Однако единого мнения по поводу факторов, обусловливающих гидрологические и климатические изменения в других регионах мира, в настоящее время в окончательном не сформулировано.

Соответственно, актуальной задачей является проблема поиска и обоснования надёжных и достоверных показателей, позволяющих выявлять направленность (цикличность) гидролого-климатических изменений не только в Арктике, но и в умеренных широтах.

Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. О характере и причинах изменений климата Земли / Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 15-23.

Bokuchava D.D., Semenov V.A., Mechanisms of the Early 20th Century Warming in the Arctic // Earth-Science Reviews. 2021. V. 222. 103820, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103820.

Callaghan, T.V.; Romanov, A.N.; Khvostov, I.V.; Ryabinin, I.V.; Tikhonov, V.V.; Shaduyko, O.M. Atmospheric and Hydrospheric Characteristics in Contrasting Arctic and Intracontinental Regions of Northern Eurasia and Possible Mutual Influences. Water 2026, 18, 251. https://doi.org/10.3390/w18020251

Kulkarni S., Ankit Agarwal, Arctic sea ice variability and its multiscale association with Indian summer monsoon rainfall at different time scales // Journal of Hydrology. 2025. V. 653. 132729, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132729.

В умеренных широтах, характеризующихся наличием сезонного промерзания почвенного покрова (Боярский и др., 2019), образования ледяного покрова на поверхности водоёмов (Романов и др., 2022), также происходят заметные гидрологические изменения, в том числе связанные с проявлениями криогенеза, в частности, с изменением глубины промерзания почвы и др.

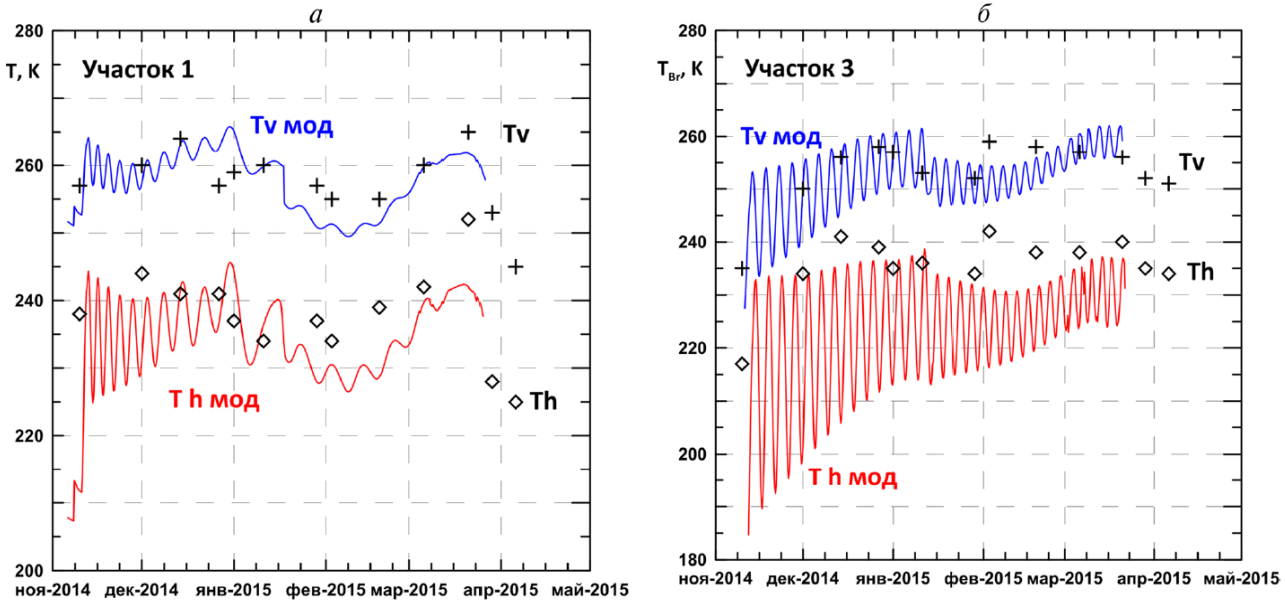


Рис. 5. Сезонные зависимости яркостной температуры на тестовых участках 1 — *а* и 3 — *б*, данные SMOS (значки) и модельный расчет (сплошные линии). Верхние кривые относятся к вертикальной поляризации, нижние — к горизонтальной.

Боярский Д.А., Романов А.Н., Хвостов И.В., Тихонов В.В., Шарков Е.А. Оценка глубины промерзания почвенного покрова по данным спутника SMOS// Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 3-13.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2019, № 2, с. 3–13

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SMOS

©2019 г. Д. А. Боярский[1]*, А. Н. Романов[2], И. В. Хвостов[2], В. В. Тихонов[1,3], Е. А. Шарков[1]

[1]*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия*
[3]*Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия*
**E-mail: dboyarski@rambler.ru*

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

Приведены результаты сравнительного анализа яркостных температур, полученных спутником SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), и соответствующих им глубин промерзания почвы, измеренных на метеостанциях, расположенных на тестовых участках Кулундинской равнины. На основе ежедневных спутниковых измерений яркостных температур изучено влияние процессов промерзания почвы на микроволновое излучение подстилающей поверхности. С использованием модели микроволнового излучения плоскослоистой неоднородной, неизотермической среды выполнен теоретический расчет зависимости яркостной температуры почвы от глубины промерзания. В качестве входных параметров модели использовались реальные параметры почв Кулундинской равнины, а также климатические характеристики исследуемых областей, полученные на метеостанциях за этот же период. Из анализа спутниковых и полевых данных, а также модельных расчетов следует, что для оценки глубины промерзания почвы по ежедневным данным спутниковой микроволновой радиометрии необходимо знать дату начала замерзания почвенного покрова, а также диэлектрические характеристики мерзлой и незамерзшей почвы на тех участках, по которым выдается продукт SMOS по яркостной температуре. На основе спутниковых данных и модели микроволнового излучения почвы с верхним мерзлым слоем предложен способ определения глубины промерзания почвенного покрова.

Ключевые слова: Кулундинская равнина, сезонно-мерзлые почвы, глубина промерзания, яркостная температура, микроволновый диапазон

DOI: https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-13

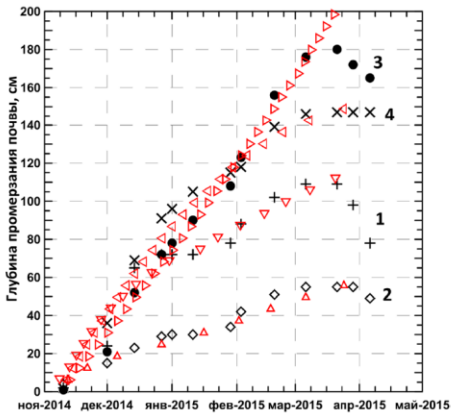


Рис. 6. Значения толщин мерзлого слоя почвы, измеренные и рассчитанные по формуле (4) для четырех исследуемых участков. Номер участка указан рядом с зависимостью, черные значки соответствуют измеренным значениям, красные треугольники — рассчитанным.

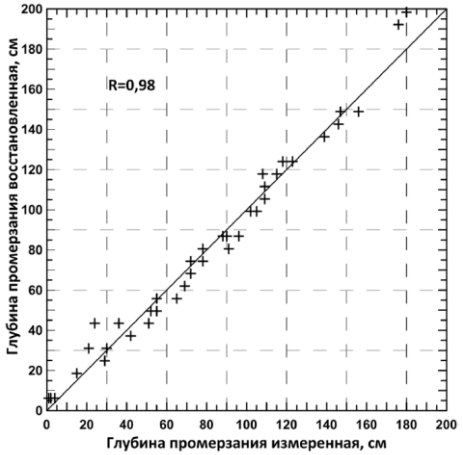


Рис. 7. Диаграмма рассеяния глубины промерзания почвы измеренной и восстановленной по интерференционной модельной зависимости.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2022, № 4, с. 12–24

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОЦЕНКА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНО-БОЛОТНЫХ УГОДИЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ, СУБАРКТИКИ И СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2022 г. А. Н. Романов[a], *, И. В. Хвостов[a], В. В. Тихонов[a, b], Е. А. Шарков[b]

[a] *Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия*

[b] *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

**E-mail: romanov_alt@mail.ru*

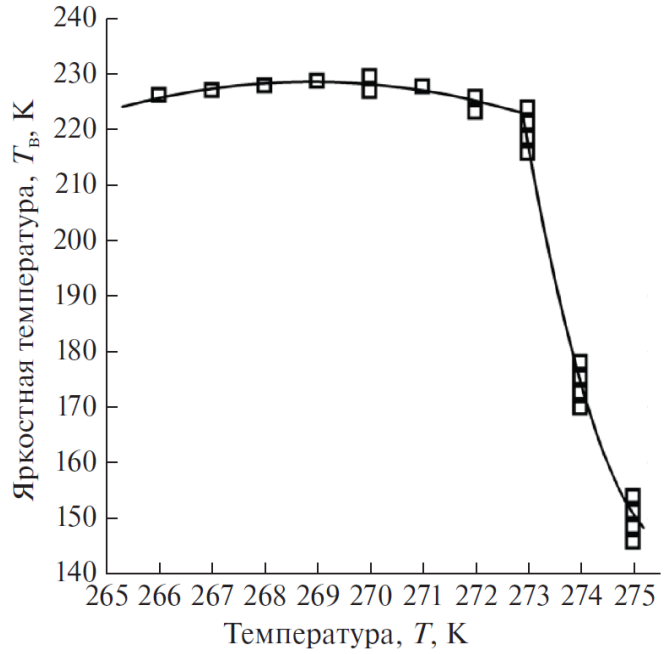
Поступила в редакцию 19.06.2022 г.

На основе ежедневных данных спутникового микроволнового зондирования изучены специфические особенности микроволнового излучения болот и заболоченных территорий Западной Сибири. Методика исследований включала в себя анализ динамики радиояркостных температур подстилающей поверхности на тестовых участках, полевые измерения физических параметров подстилающей поверхности, и лабораторные измерения диэлектрических характеристик природных сред (вода, почва, растительность). Вариации сезонной динамики радиояркостной температуры в основном обусловлены разной скоростью сезонного промерзания верхнего заболоченного слоя подстилающей поверхности. Проанализированы многолетние тренды сезонной и годовой динамики радиояркостной температуры подстилающей поверхности и оценены гидрологические изменения в Арктике и Субарктике. Полученные результаты открывают новые возможности в использовании пассивных спутниковых данных микроволнового диапазона для изучения происходящих в природе сезонных динамических процессов и прогнозирования опасных гидрологических явлений.

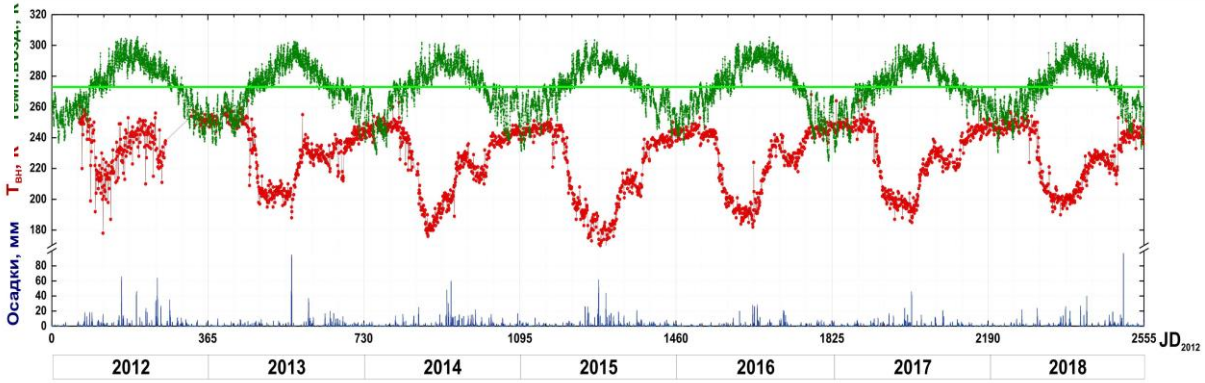
Ключевые слова: гидрологические изменения, водно-болотные угодья, Арктика, Субарктика, дистанционное микроволновое зондирование

DOI: 10.31857/S020596142204008X





Фотография разреза верхнего мерзлого слоя болота и установленная по диэлектрическим измерениям зависимость $T_{BH}(T)$ для этого слоя.



Многолетняя динамика радиояркостной температуры T_{BH}(JD) участка с болотом Мухрино (тайга) (спутник SMOS, ячейка 4023350).

Романов А.Н., Хвостов И.В., Тихонов В.В., Шарков Е.А. Оценка гидрологических изменений водно-болотных угодий Российской Арктики, Субарктики и северной тайги по данным микроволнового дистанционного зондирования //Исследование Земли из космоса. 2022. № 4. С. 12-24.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2017, № 6, с. 46–53

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРЕСНОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ ПО ДАННЫМ SMOS

© 2017 В. В. Тихонов[1,2]*, И. В. Хвостов[3], А. Н. Романов[3], Е. А. Шарков[1]

[1] Институт космических исследований РАН, Москва

[2] Московский физико-технический институт (Государственный университет), Долгопрудный

[3] Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

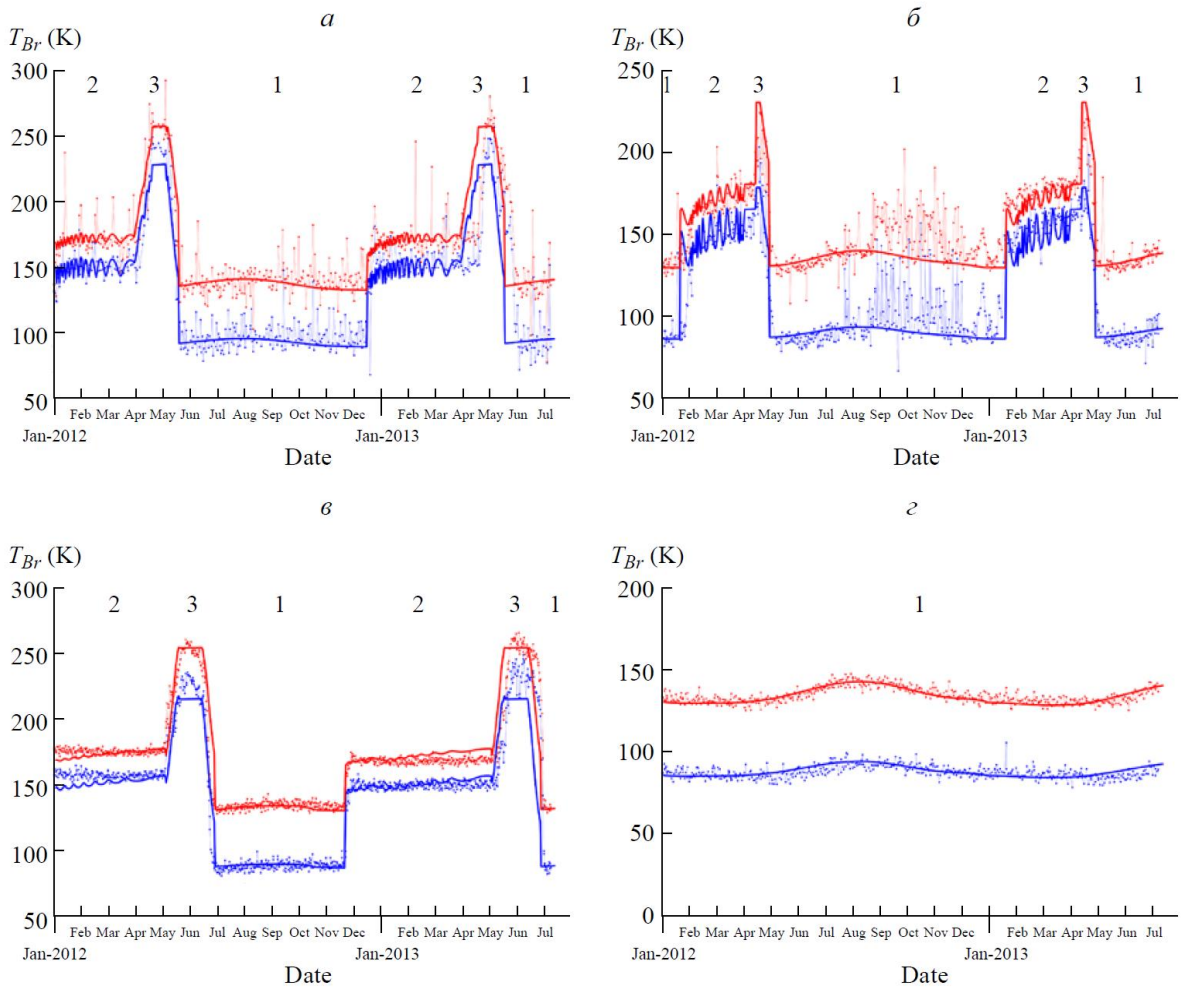
*E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 29.05.2017 г.

В работе представлен анализ сезонных вариаций яркостной температуры ряда больших пресноводных озер (Байкал, Ладожское, Большое Медвежье и Гурон) по данным радиометра MIRAS спутника SMOS. Показана возможность определения начала разрушения ледяного покрова по этим данным. Полученные выводы подтверждаются модельными расчетами. В качестве входных параметров модели использованы реальные метеорологические характеристики региона, а также гляциологические параметры исследуемых объектов.

Ключевые слова: спутниковая микроволновая радиометрия, яркостная температура, пресноводный лед, разрушение ледового покрова

DOI: 10.7868/S0205961417060045



Сезонные вариации яркостных температур участков озер: Байкал (*а*), Ладожское (*б*), Большое Медвежье (*в*), Гурон (*г*). Тонкие линии и символы – данные SMOS, толстые линии – результаты модельного расчета. Красный цвет – вертикальная поляризация, синий – горизонтальная поляризация. Цифрами обозначены характерные временные области яркостных температур.

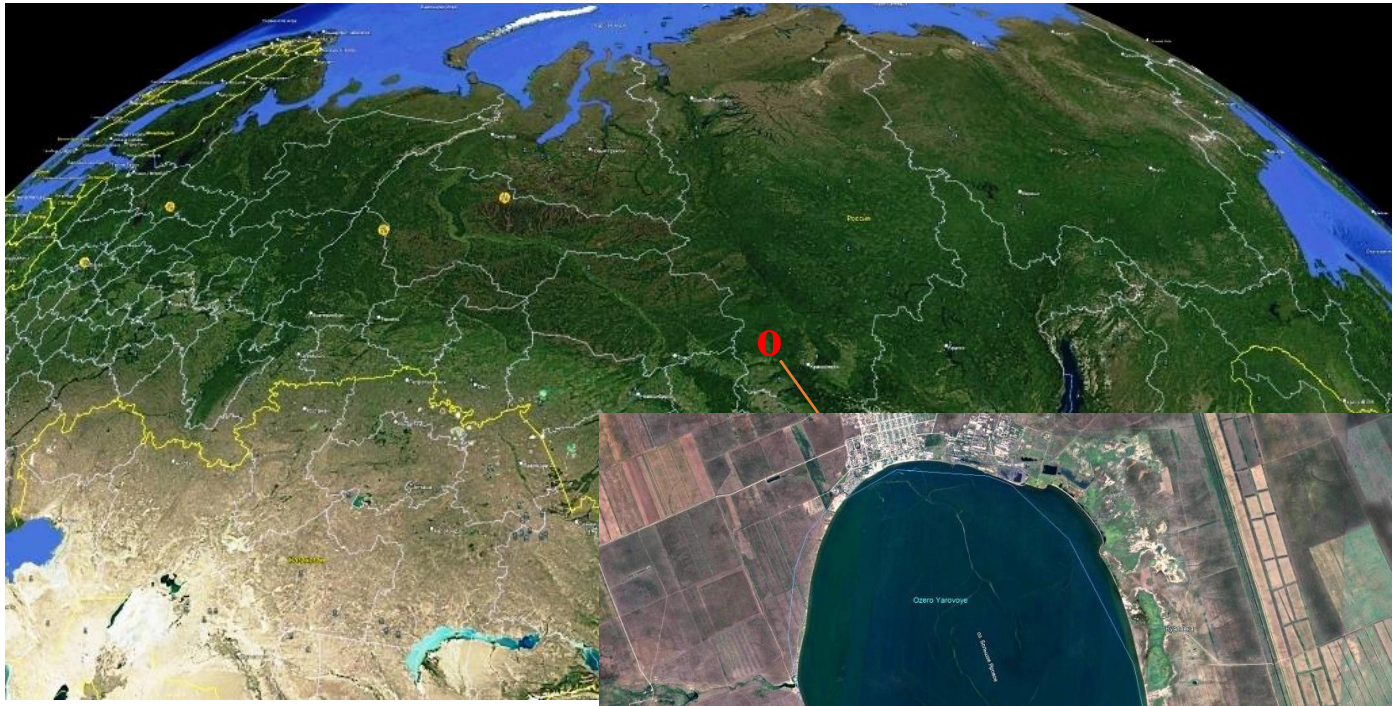
МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе приведён анализ некоторых проявлений криогенеза в умеренном поясе.

В качестве основного тестового объекта выбрано гиперсолёное озеро Большое Яровое, расположенное на территории Кулундинской равнины (Алтайский край), попадающей в сухостепную зону, характеризующуюся усиливающейся в последние годы аридизацией климата.

Методика исследований включала измерение суточной динамики температуры в разные месяцы годы на разной глубине с помощью изготовленной автономной радиометрической установки с 46 термодатчиками (Романов Д.А.), а также отбор проб воды с разной глубины на химический анализ.

В результате проведённых натурных исследований изучены новые проявления криогенеза в сухостепной зоне, связанные с образованием жидкой мерзлоты - *криопэгов*.







КРИОПЭГИ – ЖИДКАЯ МЕРЗЛОТА

В. Р. Алексеев



Владимир Романович Алексеев, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН

Вода обладает удивительным свойством растворять самые различные вещества. Ни одна другая жидкость не содержит такого обилия химических элементов, как обыкновенная H_2O. Абсолютно чистой воды в природе не существует. Даже во взвешенных атмосферных каплях и ледяных кристаллах присутствуют микроскопические доли инородных веществ. В процессе выпадения дождя и снега, талого стока по поверхности земли и инфильтрации в толщу земной коры водные массы постепенно насыщаются химическими элементами, все больше и больше. В некоторых случаях, например, при интенсивном испарении воды в замкнутых котловинах и в результате криогенного концентрирования, количество растворенных солей может измеряться десятками и даже сотнями граммов на 1 литр. Спектр природных вод по количеству и составу растворенных веществ очень широк. Принята следующая категоризация воды по степени ее минерализации: пресные – до 1 г/л, солоноватые – от 1 до 10 г/л, соленые – от 10 до 50 г/л, рассолы – свыше 50 г/л.

Пресная вода переходит в лед при 0° С, а другие категории воды замерзают при температуре значительно ниже 0° С. Все зависит от степени минерализации: чем больше в жидкости растворенных веществ, тем ниже точка ее замерзания. Диапазон отрицательных температур, в пределах которого различные по химическому составу водные растворы могут находиться в жидком (незамерзшем) состоянии, измеряется десятками градусов (таблица). В естественных условиях в воде растворены самые разные вещества, поэтому температура ее замерзания зависит от соотношения и количества веществ в растворенном виде. Так, морская вода соленостью 10‰ замерзает при температуре –0,5° С, соленостью 25‰ – при температуре –1,35° С, соленостью 40‰ – при температуре –2,2° С. Природные воды, имеющие отрицательную температуру, но находящиеся в жидком состоянии, называются ***криопэгами***.

Криопэги – безусловный объект криосферы Земли, однако выделены они сравнительно недавно [1], поэтому изучены еще недостаточно. Было

Температура замерзания однокомпонентных растворов $T_{эв}$ при их полном насыщении $C_э$ (эвтектическом концентрировании)

Состав раствора	$T_э$, ° С	$C_э$, г/л (*г/кг)	Твердая фаза в эвтектической точке
Na_2SO_4	–1,2	42	лед + $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$
$CuSO_4$	–1,6	234*	лед + $CuSO_4 \cdot 5H_2O$
$FeSO_4$	–1,8	263*	лед + $FeSO_4 \cdot 7H_2O$
$NaCO_3$	–2,1	61	лед + $Na_2CO3 \cdot 10H_2O$
$MgSO_4$	–4,8	229	лед + $MgSO_4 \cdot 12H_2O$
Na_2S	–9,0	81	лед + $Na_2S \cdot 9H_2O$
NaCl	–21,2	304	лед + $NaCl \cdot 2H_2O$
NaBr	–28,2	675	лед + $NaBr \cdot 5H_2O$
$MgCl_2$	–33,5	266	лед + $MgCl_2 \cdot 12H_2O$
$MgBr_2$	–42,7	582	лед + $MgBr_2 \cdot 10H_2O$
$CaCl_2$	–49,8	439	лед + $CaCl_2 \cdot 6H_2O$
LiCl	–67,0	316	лед + $LiCl \cdot 5H_2O$
LiBr	–72,0	642	лед + $LiBr \cdot 5H_2O$
$CaBr_2$	–83,0	869	лед + $CaBr_2 \cdot 6H_2O$

МИР НАУКИ, КУЛЬТУРЫ, ОБРАЗОВАНИЯ. № 6 (25) 2010

Л.А. Долматова, *канд. хим. наук, н. с. ИВЭП СО РАН, г. Барнаул, E-mail: puzanov@ivep.asu.ru*

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗ. БОЛЬШОЕ ЯРОВОЕ

Исследовано изменение гидрохимических показателей воды оз. Б. Яровое в периоды весеннего нагревания и осеннего охлаждения. Показано, что в период осеннего охлаждения количественные значения гидрохимических характеристик воды озера были максимальны, а в период весеннего нагревания – минимальны. В оба исследованных периода была отмечена температурная, кислородная и химическая стратификация как для более глубоких, так и точек с небольшой глубиной.

Ключевые слова: **гидрохимические характеристики, биогенные вещества, концентрация основных ионов, метаморфизация, минерализация, стратификация.**

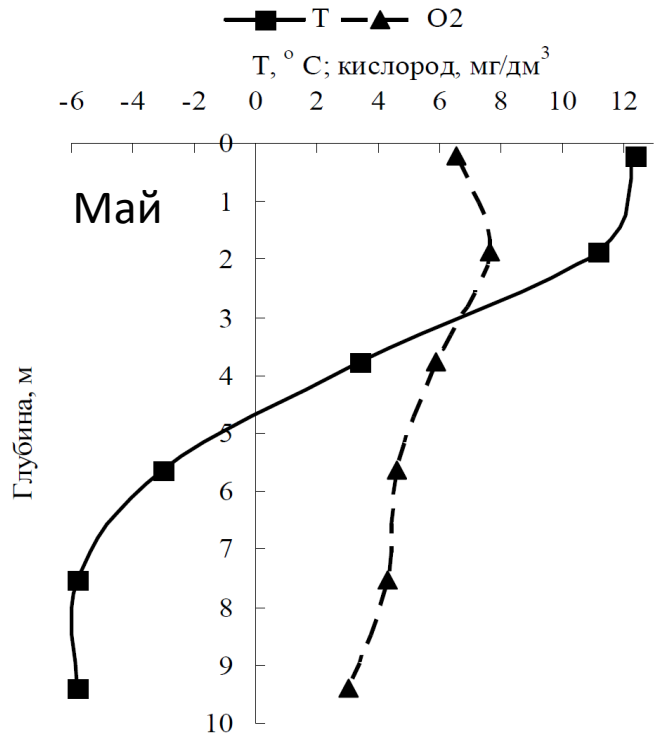
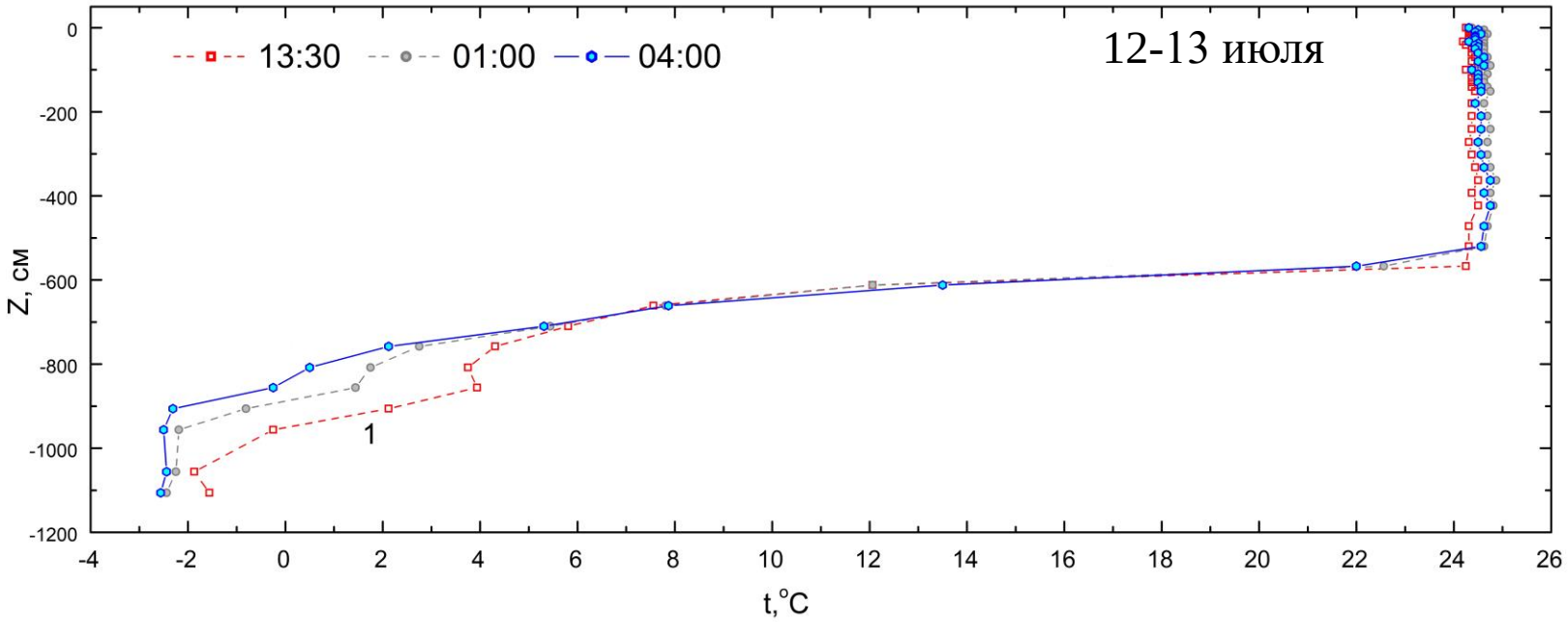


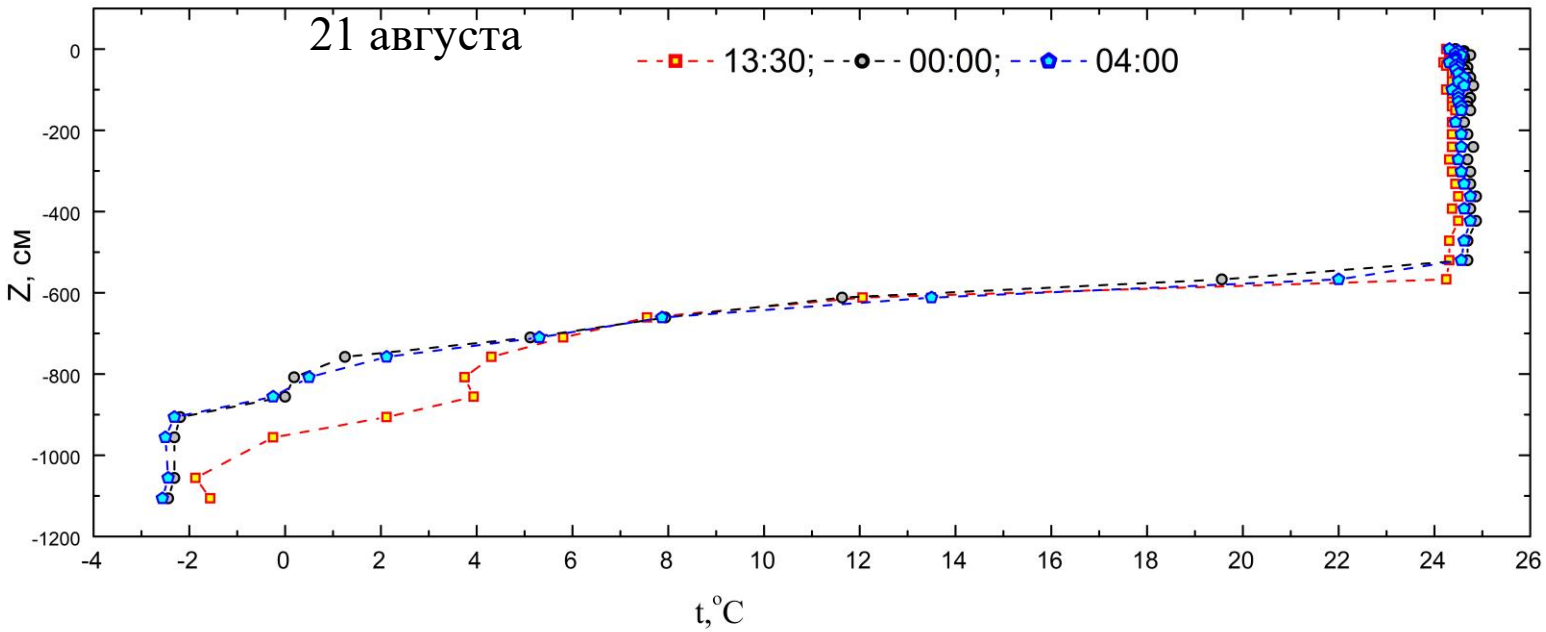
Рис. 2. Распределение температуры и концентрации растворенного кислорода по глубине (19.05.10 г., середина озера)

Стратификация температуры воды на разной глубине

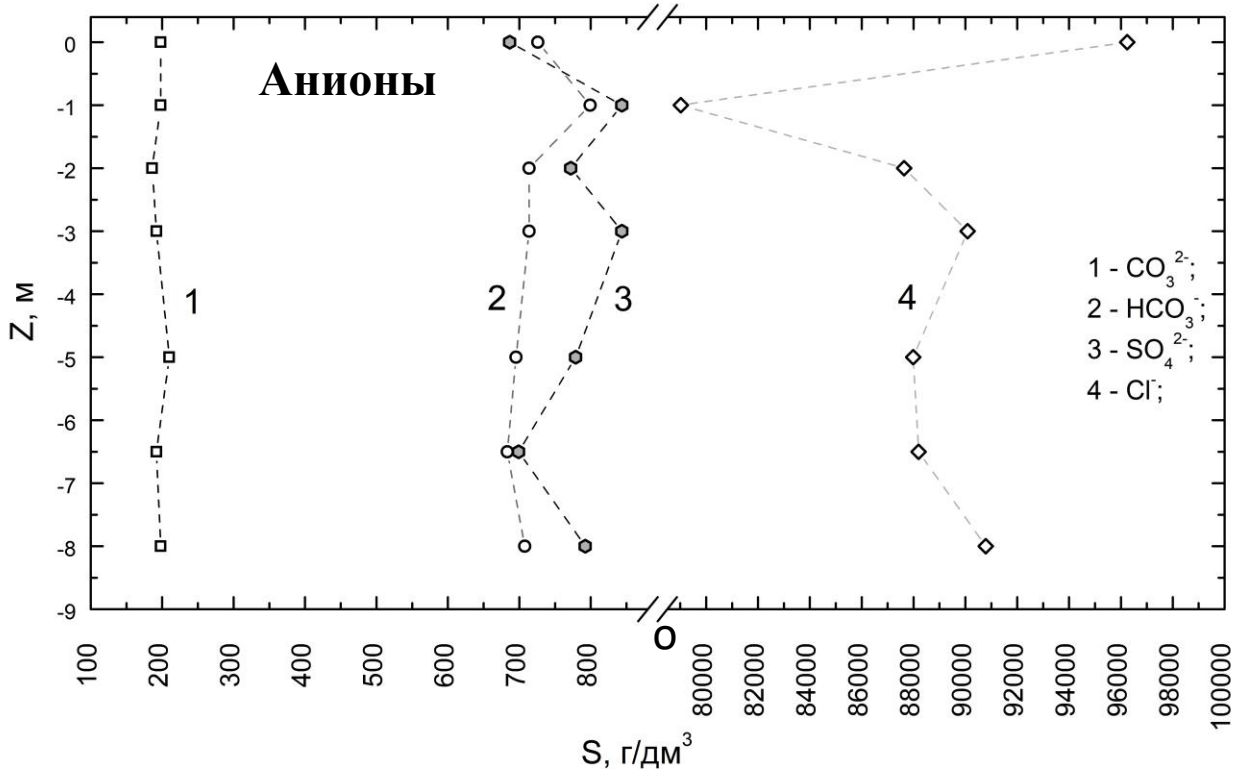


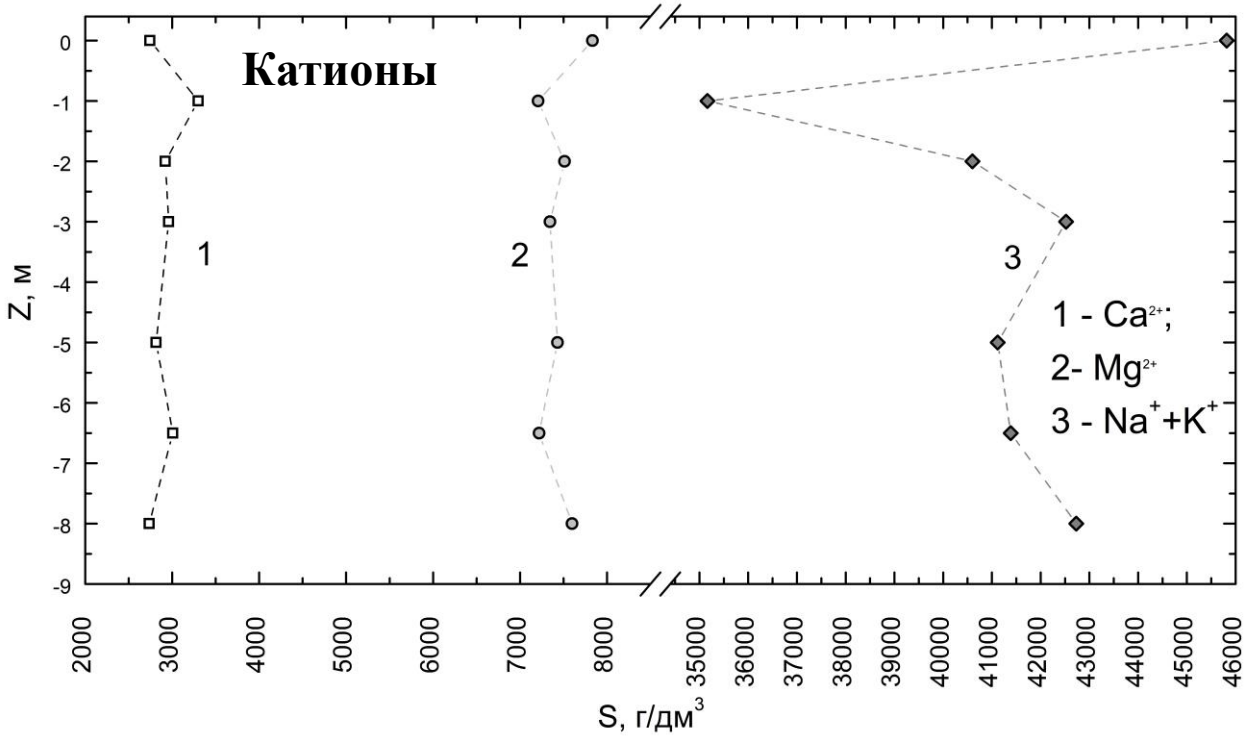




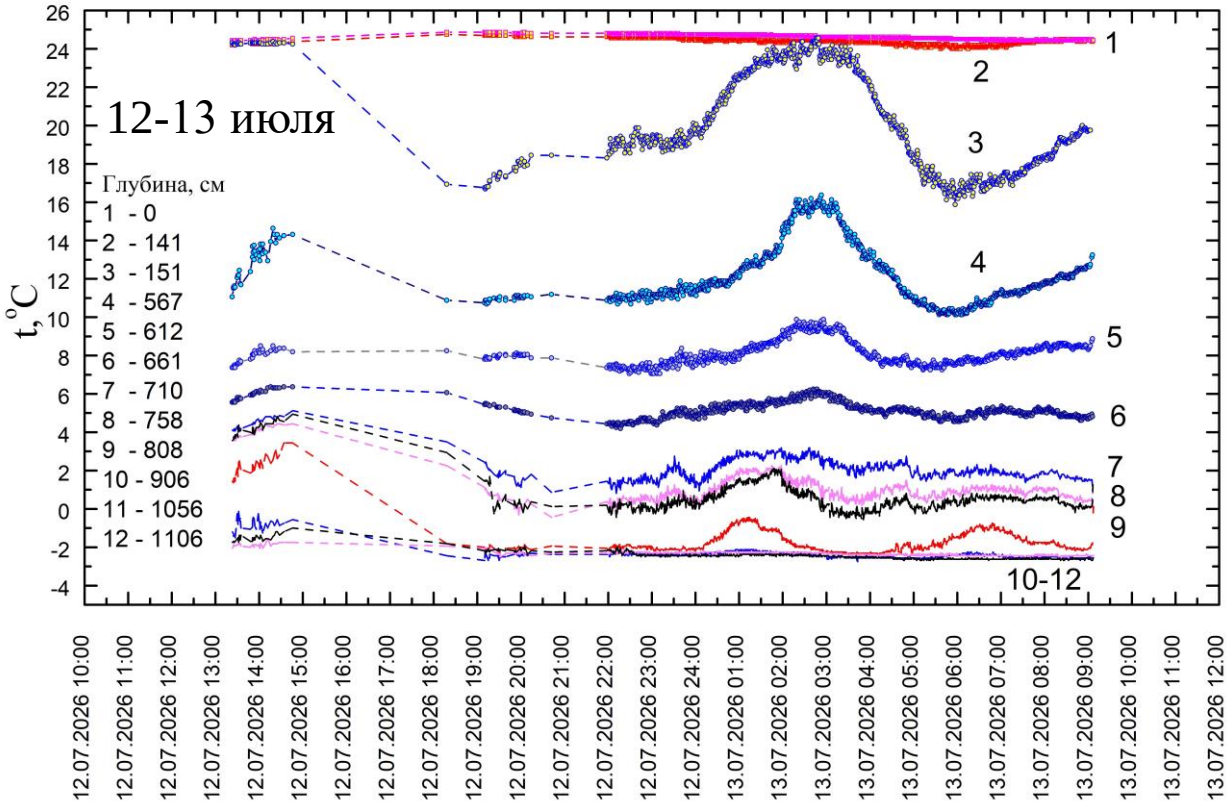


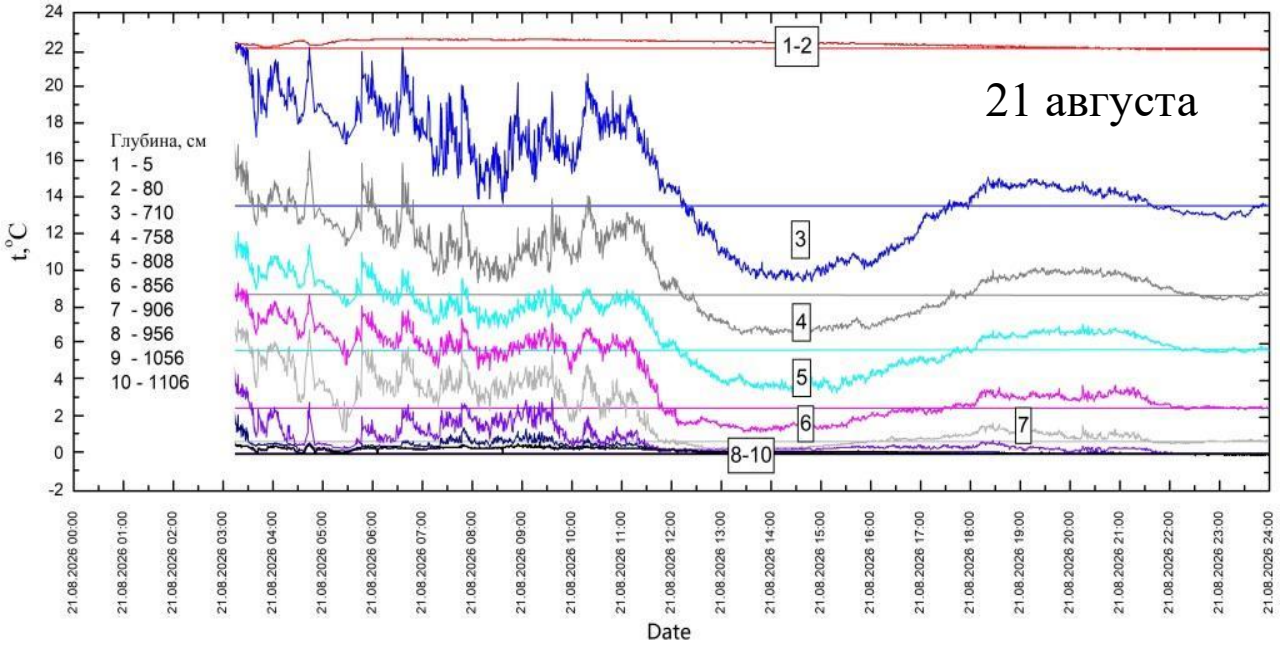
Стратификация состава катионов и анионов по глубине





Суточная динамика температуры воды на разной глубине





Выводы

В сухостепной зоне с высокими летними температурами (с прогреванием водной поверхности внутренних водоёмов до 25-30 ^{O}C, прогреванием почвенного покрова до 65-70 ^{O}C) могут существовать криогенные проявления в виде жидкой мерзлоты - криопэгов (*cryopegs*). Продолжительность существования криопэгов (сезонность, «многолетность») может указывать на происходящие в регионе с водными объектами гидрологические и климатические изменения.

Вопросы, на которые пока нет точного ответа:

1. Как ведёт себя осенью и зимой (после жаркого лета) 5-метровый поверхностный слой воды, нагретой до 26°C?
2. Может ли криопэг существовать несколько лет подряд? Результаты исследований не исключают такую возможность.
3. Может ли многолетняя динамика криопэгов использоваться как критерий гидролого-климатических изменений? Вопрос находится в стадии изучения.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН (FUFZ-2026-0003) и темы «Мониторинг» Института космических исследований РАН (номер госрегистрации № 126031818938-6).


Благодарим за внимание