

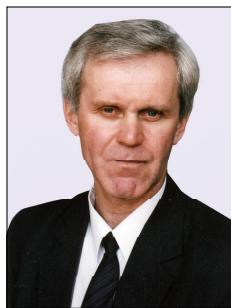
Науки о Земле

УДК: 551.326.85

DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-6-16

РАДИОТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ОЗЕРА АРАХЛЕЙ КАК ГЕОИНДИКАТОР ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНОГО ОБЪЕКТА

RADIOTHERMAL RADIATION OF THE ICE COVER OF THE ARAKHLEY LAKE AS A GEO-INDICATOR OF CHANGES IN A WATER BODY



В. Б. Венславский,
Забайкальский государственный
университет, г. Чита
venslav-vb@mail.ru



А. О. Орлов,
Институт природных ресурсов, экологии и
криологии СО РАН, г. Чита
Orlov_A_O@mail.ru



Ю. В. Харин,
Институт природных ресурсов, экологии
и криологии СО РАН, г. Чита
harinjv@mail.ru

V. Venslavsky,
Transbaikal State University, Chita

A. Orlov,
Institute of Natural Resources, Ecology and
Cryology SB RAS, Chita

Yu. Kharin,
Institute of Natural Resources, Ecology and
Cryology SB RAS, Chita

Объектом исследования являлась экосистема пресноводного озера, предметом – радиотепловое излучение ледяного покрова как геоиндикатор изменения экологического состояния озера Арахлей. На основе системного оценивался вклад сезонной изменчивости свойств ледяного покрова на интенсивность радиотеплового излучения как геоиндикатора экологической системы. Влияние деформации ледяного покрова в период трещинообразования на интенсивность радиотеплового излучения недостаточно изучено, что определило актуальность экспериментального исследования для применения в задачах по оценке антропогенных факторов воздействия. Целью исследования являлось измерение сезонной изменчивости интенсивности радиотеплового излучения как фонового геоиндикатора температурного режима и деформации ледяного покрова в период трещинообразования в условиях отсутствия прямых антропогенных факторов.

В январе-марте 2020 г. дистанционными радиофизическими методами исследована интенсивность радиотеплового излучения микроволнового диапазона для тестовой площадки ледяного покрова озера Арахлей при синхронных контактных измерениях деформации и температуры в нише на глубине 40 см от поверхности. По полученным данным зафиксирована реакция сигнала датчика деформации на суточные вариации температуры с отставанием по времени на 1...3 ч. По результатам исследования коэффициент корреляции данных канала деформации льда и интенсивности радиотеплового излучения в диапазоне 8...14 мм превышал $\pm 0,7$ (при окне 1000 с) с данными датчика температуры на большинстве участков $\pm 0,9$. Это доказывает взаимосвязь температуры и деформации ледяной поверхности с интенсивностью радиотеплового излучения как сезонным геоиндикатором при определении экологического состояния озера. Приращения радиояркостной температуры в период усиления образования трещин в канале диапазона 14 мм при значимой корреляции с данными деформации составили приблизительно 3...6 К, что также может служить геоиндикатором сезонных изменений свойств ледяного покрова.

Результаты исследования получены в условиях отсутствия прямых антропогенных факторов и являются фоновыми геоиндикаторами сезонного состояния ледяного покрова в период температурных и динамических нагрузок при деформации и трещинообразовании и в будущем будут использованы на практике для коррекции при оценке воздействия антропогенных факторов

Ключевые слова: ледяной покров; геоиндикатор; дистанционное зондирование; радиотепловое излучение; трещинообразование; деформация льда; датчик деформации; корреляция данных; антропогенные факторы

The object of this study was the ecosystem of a water body; the subject was the radio-thermal radiation of the ice cover as a geo-indicator of changes in the ecological state of the Lake Arakhley. On the basis of a systematic approach, the work assessed the contribution of the seasonal variability of the properties of the ice cover to the intensity of radio-thermal radiation as a geo-indicator of the ecological system. At present, the influence of the ice cover deformation during the crack formation period on the intensity of radio-thermal radiation has not been sufficiently studied, which determined the relevance of an experimental study for use in problems of assessing anthropogenic factors of influence. The aim of the study was to measure the seasonal variability of the intensity of radio-thermal radiation as a background geo-indicator of the temperature regime and deformation of the ice cover during the crack formation period in the absence of direct anthropogenic factors.

In January–March 2020, remote radio-physical methods were used to study the intensity of radio-thermal radiation of the microwave range for the test area of the ice cover of the Lake Arakhley during synchronous contact measurements of deformation and temperature in a niche at a depth of 40 cm from the surface. According to the data obtained, the reaction of the deformation sensor signal to daily temperature variations with a time lag of 1...3 hours was recorded. According to the results of the study, the correlation coefficient of the data of the ice deformation channel and the intensity of radio-thermal radiation in the range of 8...14 mm exceeded ± 0.7 (with a window of 1000 s), with the data of the temperature sensor in most areas exceeded ± 0.9 . This proves the relationship between the temperature and deformation of the ice surface with the intensity of radio-thermal radiation, as a seasonal geo-indicator in determining the ecological state of the lake. The increments in the brightness temperature during the period of increased crack formation in the 14 mm channel, with a significant correlation with the deformation data, were about 3...6 K, which can also serve as a geo-indicator of seasonal changes in the properties of the ice cover.

The results of the study were obtained in the absence of direct anthropogenic factors and are background geoindicators of the seasonal state of the ice cover during the period of temperature and dynamic loads during deformation and cracking, and in the future will be used in practice for correction in assessing the impact of anthropogenic factors

Key words: ice cover; geo indicator; remote sensing; thermal radiation; cracking; ice deformation; deformation sensor; data correlation; anthropogenic factors

Введение. Результаты радиофизических исследований Земли из космоса, с борта самолетов и кораблей для целей геоэкологического мониторинга принято сопоставлять с данными исследований контактными и дистанционными методами со стационарных платформ. Комплексные измерения определяют достоверность выполненных дистанционных измерений [3; 5; 7; 10; 14; 15]. Известно, что лед является чувствительным индикатором природных процессов [2; 3; 8; 12]. Это свойство используется при микроволновом дистанционном зондировании ледяных покровов для определения экологического состояния водного объекта при определении загрязнения вод, степени их эвтрофирования и ряда других параметров [2; 3; 7; 9; 11; 15; 16]. При их нахождении требуется отделить искомые параметры от мешающих, например, связанных с сезонными изменениями температуры воздуха. Интенсивность СВЧ-излучения гладкой поверхности ледяного покрова определяется его температурой, коэффициентом излучения для данного угла и поляризации, а также свойствами и геометрией жидких и газовых включений (пузырей, трещин) [2; 7; 11; 12;

15]. Одним из факторов, влияющих на изменения собственного СВЧ излучения является деформация и образование трещин в условиях суточных изменений температуры и динамических нагрузок, вызванных волновыми движениями [2; 6; 8; 10; 11; 12]. Результаты данного исследования востребованы как фундовые (приближенные к отсутствию прямых антропогенных факторов) для практического применения в последующих дистанционных измерениях параметров экосистемы с наземной лаборатории. Выявление корреляции данных сезонных изменений ледяного покрова с его радиотепловым излучением в настоящее время актуально и востребовано в задачах математического моделирования для коррекции при анализе вклада антропогенных факторов экологической системы водного объекта.

Методология и методика исследования. Методологической основой настоящего исследования является системный подход на основе принципа непосредственного изучения и учета сезонной специфики излучательных свойств компонентов ледяного покрова в условиях отсутствия прямых антропогенных воздействий. Влияние косвенных и услов-

ных антропогенных факторов и их оценка по шкале антропогенной дигрессии не исследовалась. В экологической системе пресноводного озера в зимнее время требуется выделить компоненты, оказывающие специфические сезонные проявления и влияющие на радиотепловое излучение, для коррекции (вычитании из интегрального результата) при регистрации в будущем данных в условиях воздействия прямых антропогенных факторов.

Объектом исследования являлась экосистема пресноводного озера, предметом исследования – радиотепловое излучение ледяного покрова как геоиндикатор изменения экологического состояния озера Арахлей (система Ивано-Арахлейских озер, расположенных в Забайкальском крае на отрогах Яблонового хребта на высоте 940 м над уровнем моря). На основе системного подхода оценивался вклад сезонной изменчивости свойств ледяного покрова на интенсивность радиотеплового излучения как геоиндикатора экологической системы. Влияние сезонных изменений ледяного покрова под действием температурных и динамических нагрузок в период трещинообразования на интенсивность радиотеплового излучения является недостаточно изученным и представляется актуальным для решения задач по оценке антропогенных факторов воздействия. Цель исследования – измерение сезонной изменчивости интенсивности радиотеплового излучения как фонового геоиндикатора температурного режима и деформации ледяного покрова в период трещинообразования в условиях отсутствия прямых антропогенных факторов.

Задачи исследования:

- выбрать тестовую площадку без влияния прямых антропогенных факторов;
- создать и применить аппаратно-программные комплексы для регистрации параметров экосистемы – деформации, температуры и радиояркостной температуры ледяного покрова в микроволновом диапазоне;
- выявить влияние сезонных вариаций температуры и деформации в период трещинообразования в верхнем слое ледяного покрова на изменения интенсивности радиотеплового излучения в условиях отсутствия прямых антропогенных факторов.

Методика постановки эксперимента основана на обеспечении мониторинга кон-

тактных и дистанционных измерений с последующей синхронизацией записанных данных по времени регистрации. Выделение из интегрального радиометрического сигнала вклада отдельных компонентов, связанных с деформацией и образованием трещин, потребовало экспериментального выявления более чувствительного диапазона. Приращения интенсивности радиотеплового излучения в период трещинообразования оценивались в условиях отсутствия прямых антропогенных факторов среди по визуальным наблюдениям и данным анализа проб верхнего слоя и соскобов поверхности льда в начале и в конце эксперимента.

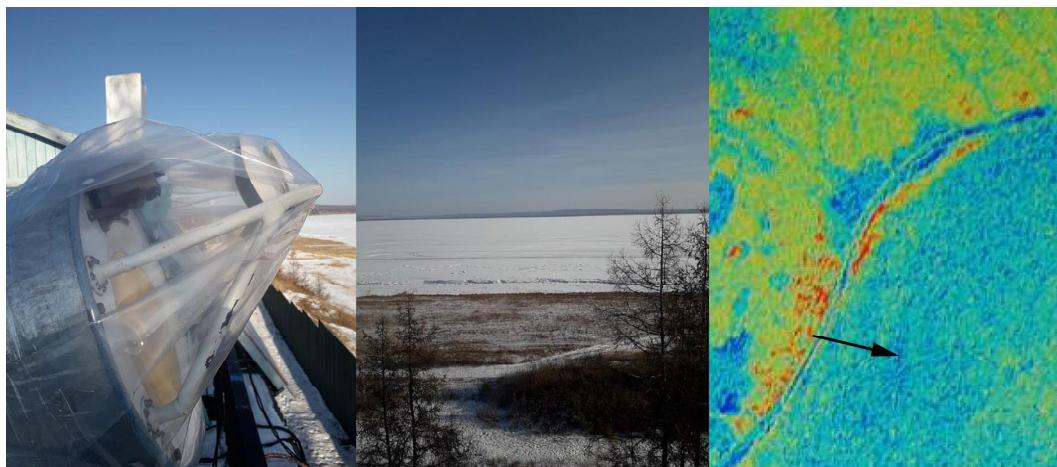
Внедрение разработанной методики синхронных контактных и дистанционных измерений выполнялось в январе-марте 2020 г. на частично заснеженной площадке приблизительно в 400 м от береговой спайки ледяного покрова. Многоканальный радиометрический комплекс дистанционного СВЧ-зондирования установлен на стационарной платформе на крыше здания лаборатории на высоте более 20 м над уровнем озера (рис. 1).

В состав радиометрического комплекса вошли СВЧ-радиометры (R) на вертикальной (ВП) и горизонтальной (ГП) поляризациях. Это микроволновые радиометры R0.3, R0.8 и R1.4 (аналог «МИВЗА» [1] на длинах волн $\lambda = 3$ мм ВП, $\lambda = 8$ мм ВП и ГП, $\lambda = 14$ мм ВП и ГП); радиометр R2 ($\lambda = 20$ мм ВП, ГП) с параболической антенной; радиометры на $\lambda = 8$ мм и $\lambda = 13,5$ мм с рупорными антеннами (см. рис. 1). Аналоговые сигналы с выходов СВЧ-блоков радиометров по кабелю передавались в блоки низкочастотной обработки и систему оцифровки и сбора фирмы «Agilent» с записью в компьютер в режиме реального времени [13]. К системе сбора данных подключены каналы метеостанции и видеонаблюдения. Береговая система сбора данных была запрограммирована на запись с постоянной интегрирования 1 с и интервалами работы на разных поляризациях. Антенные СВЧ-блоки радиометров установлены в восточном направлении под настильном углом зондирования, значительно превышающим для ледяного покрова угол Брюстера (см. рис. 1). Калибровка радиометров осуществлялась в ночное время при безоблачной атмосфере по разности показаний радиояркостной температуры в nadir и с эталонной

нагрузки с известной термодинамической температурой. Точность абсолютных измерений составляла приблизительно 1 К.

Контактные измерения деформации верхнего слоя ледяного покрова исследуемой площадки осуществлялись с помощью модернизированного индуктивного датчика деформаций между двумя точками на расстоянии 1 м, построенного на основе регистрации положения ферритового сердечника в индуктивном делителе [4]. Усиленная разность сигналов с датчика передавалась в систему сбора информации, включающую 16-разрядный АЦП AD7739 и микроконтроллер STM32, настроенный на вывод данных с интервалом 1 с на microSD-карту. Кроме датчика деформации льда в приборе разработан датчик температуры. Точность измерения

температуры приблизительно 0,1 °С, деформации – 5 мкм. Автономность работы прибора обеспечена электропитанием от автомобильного аккумулятора 12 В 55 Ач. Замена аккумулятора и карты памяти осуществлялась через каждые 6...7 суток. Для устранения проблем с внешними воздействиями комплекс приборов установлен в выпиленной во льду нише глубиной 40 см, закрыт щитом и засыпан снегом (рис. 2). Измеритель деформации установлен вблизи области, от которой наблюдали собственное излучение ледяного покрова СВЧ-радиометрами. Расположение датчика деформации и его ориентация выбраны по азимуту направления осей антенн в пределах 50...100 м от антенного пятна (стрелка на радиолокационном снимке, см. рис. 1).



*Рис. 1. Ориентация установки дистанционного и контактного аппаратно-программных комплексов /
Fig. 1. Orientation of remote and contact hardware-software complexes installation*



*Рис. 2. Система регистрации и сбора данных деформации и температуры /
Fig. 2. System for registration and collection of deformation and temperature data*

Результаты исследования и область их применения. В процессе измерения в верхнем слое ледяного покрова на глубине 40 см выявлены циклические вариации сигналов с датчика деформации, которые сдвинуты по времени с данными измерения температуры (рис. 3; 4). В изолированной от внешних воздействий нише изменения суточных температур составили менее 3 °С, при колебаниях температуры воздуха по показаниям метеостанции более 10...15 °С. Измерения в период 31.01–06.02.2020 проходили при понижении ночных и постепенном повышении

вариаций дневных температур. На графике записи данных с датчика температуры в корпусе прибора наблюдалось понижение температуры до –18 °С при суточных вариациях охлаждения приблизительно на 2 °С в темное время и незначительный прогрев к 15:00. В результате сезонного потепления вариации прогрева в корпусе датчика деформации увеличились с 0,3 °С 1 февраля 2020 г. до 1,3 °С 5 февраля 2020 г. На графике деформации наблюдаются суточные вариации до 100 мкм при общей тенденции постепенного расширения (см. рис. 3).

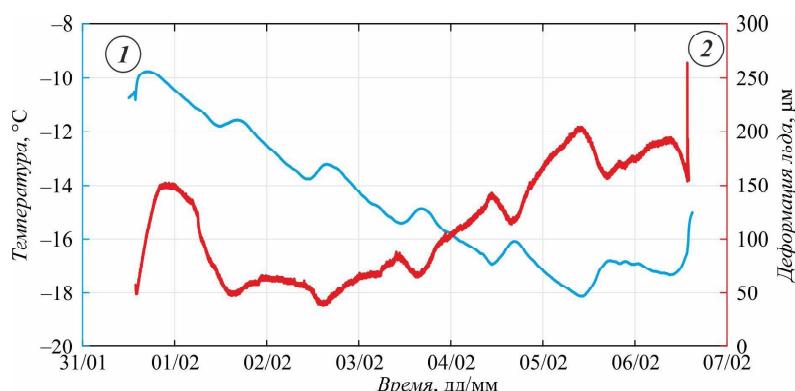


Рис. 3. Вариации температуры (1) и деформации льда (2) на глубине 0,4 м 31.01.2020–06.02.2020 /
Fig. 3. Variations in temperature (1) and ice deformation (2) at a depth of 0.4 m from
31.01.2020 to 06.02.2020

Взаимосвязь вариаций сигналов с контактного датчика деформации с каждым радиометрическим каналом берегового СВЧ комплекса оценена с помощью расчета коэффициента корреляции для окна 1000 точек (1000 с ~ 16,7 мин). В период 10:20...21:00 3 февраля 2020 г. коэффициенты корреляции сигналов радиометра R1.4 с данными датчика деформации составили более ±0,7 (для R0.8 ±0,6), а с данными датчика температуры – более ±0,9. Для других каналов СВЧ-комплекса рассчитанная корреляция с данными канала деформации оказалась менее значимой, что позволило оптимизировать анализ данных. Положительные значения коэффициента корреляции, как известно, соответствуют совпадению знаков приращений сигналов, отрицательные – их противоположному направлению. На интервалах повышения температуры воздуха по данным метеостанции в период 12:00...15:00 коэффициент корреляции канала R1.4 и датчика деформации составил порядка +0,7 (для R0.8 +0,6). Коэффициент корреляции R1.4 и

датчика температуры в этом же временном интервале –0,9 (для R0.8 также –0,9). На интервалах понижения температуры воздуха, по данным метеостанции (18:00...20:30), коэффициент корреляции канала R1.4 и датчика деформации соответствовал –0,7 (для R0.8 также –0,7). Для тех же интервалов времени 4 февраля 2020 г. результаты расчета коэффициента корреляции для каналов R1.4 и R0.8 полностью повторились. Эти результаты позволяют использовать данные дистанционного измерения радиояркостной температуры ледяного покрова в качестве геоиндикаторов сезонных изменений состояния водного объекта.

В период 06.02.2020–13.02.2020 началось постепенное потепление и, по данным с датчика деформации, появились импульсы (резкие выбросы) сигнала, соответствующие градиентным участкам на графике температуры (см. рис. 4). Отставание данных с датчика деформации по времени наблюдалось в пределах 1...3 ч. Появление импульсов сигнала датчика деформации можно объяснить

образованием локальных трещин или разрывов во льду, связанных с термическими и динамическими нагрузками [2; 8; 12]. В этот период начала потепления проявляется образование трещин, сопровождаемое звуковым эффектом (треском льда) и появлением

волн деформации в ледяном покрове, спаянном берегами. Коэффициенты корреляции сигналов в каналах радиометров R1.4 и R0.8 с данными датчика деформации для окна 1000 точек на некоторых временных интервалах возросли до $\pm 0,8$.

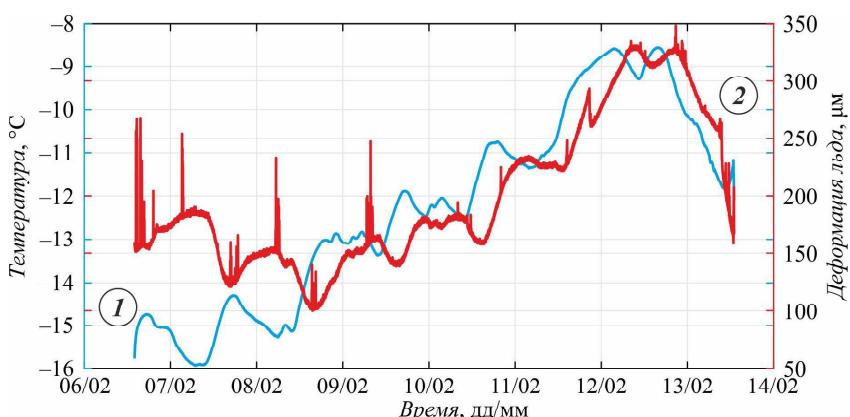


Рис. 4. Вариации температуры (1) и деформации льда (2) на глубине 0,4 м в период 06.02.2020–13.02.2020 / Fig. 4. Variations in temperature (1) and ice deformation (2) at a depth of 0.4 m from 06.02.2020 to 13.02.2020

По данным контактных измерений 7 февраля 2020 г. в интервале 00:00...06:00 наблюдалось понижение температуры воздуха $-18\ldots-27^{\circ}\text{C}$, при этом на глубине 40 см отмечались изменения $-15,1\ldots-15,9^{\circ}\text{C}$ (рис. 5). В период с 03:12 на графике данных с датчика деформации видны импульсы сигнала с амплитудой до 70 мкм, повторяющиеся с интервалом около 3 мин в течение 0,3 ч с постепенным уменьшением амплитуды до 20 мкм. Коэффициенты корреляции сигналов в канале радиометра R1.4 и R0.8 с данными датчика деформации для окна 300 точек (приблизительно 5 мин) на временном интервале регистрации импульсов достигала $\pm 0,6$.

По данным контактных датчиков температуры и деформации льда в период 13.02.2020–21.02.2020 в исследуемом объекте наблюдалось постепенное сезонное потепление и стабилизация средней температуры на уровне $-12,0^{\circ}\text{C}$ с амплитудой $1,5\ldots2,0^{\circ}\text{C}$ (рис. 6). Вариации показаний датчика деформации, по данным измерений, соответствуют суточному периоду с амплитудой 50...70 мкм и насыщены частыми импульсами до 80 мкм, вызванными образованием и замерзанием трещин или волнами во льду при образовании крупных сухих трещин в ледяных полях. Сигналы с датчика деформации отстают по времени от данных с датчика температуры до 3 ч, а частота их появления

возрастает. Коэффициенты корреляции сигналов в канале радиометра R1.4 с данными датчика деформации для окна 1000 точек на некоторых временных интервалах достигали $\pm 0,8$, приращения измеряемой радиояркостной температуры 3...6 К.

Измеренные вариации деформации льда на глубине 40 см свидетельствуют, на наш взгляд, о тенденции нарастания и сбросе напряжений при образовании трещин, влияющих на собственное радиотепловое излучение тестируемой площадки в антенном пятне.

В период 18:00...24:00 14 февраля 2020 г. при равномерном понижении температуры воздуха до -15°C сопоставлены по времени данные с датчиков деформации и температуры с вариациями сигналов СВЧ-радиометров R0.8, R1.4 и R2.0 мм на ВП и ГП (рис. 7). Минимум на графике приращения радиояркостной температуры на длине волны 14 мм совпадает с экстремумом на графике контактного измерения температуры на глубине 40 см и с проявлением локальных импульсов сигналов с датчика деформации. Приращение радиояркостной температуры в канале R1.4 в этот период составили 3...6 К. При нарастании частоты образования трещин (судя по импульсам деформации) коэффициент корреляции на данных временных интервалах превышал $\pm 0,7$.

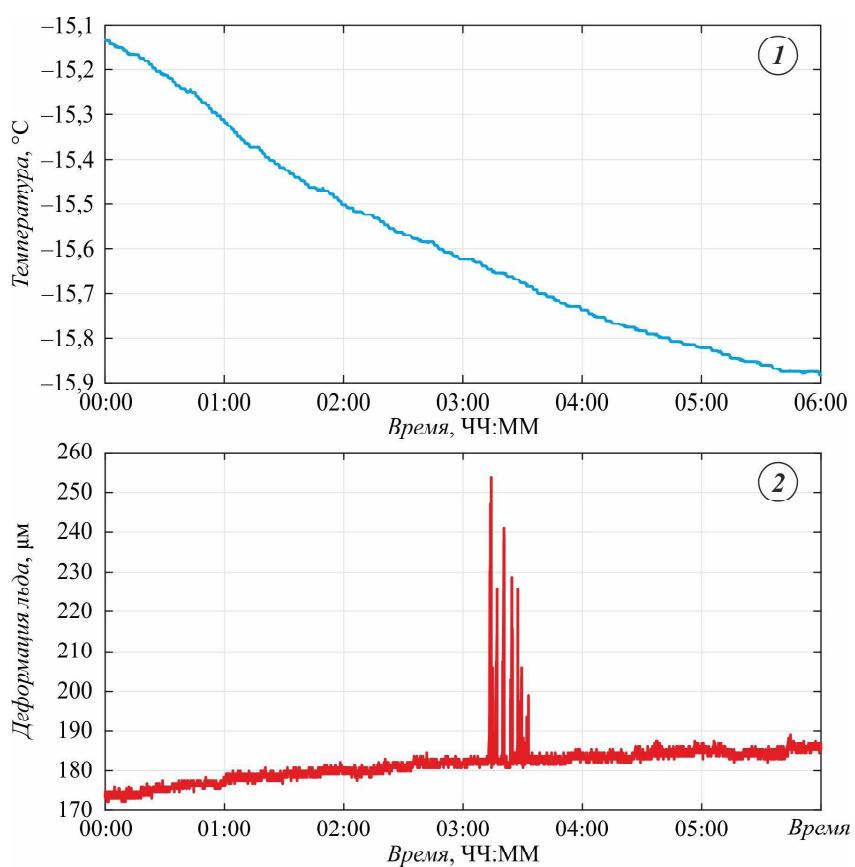


Рис. 5. Понижение температуры (1) и вариации деформации льда (2) на глубине 0,4 м 07.02.2020 г. в интервале 00:00...06:00 / Fig. 5 Decrease in temperature (1) and variations in ice deformation (2) at a depth of 0.4 m 07.02.2020 in the interval from 00:00 to 06:00

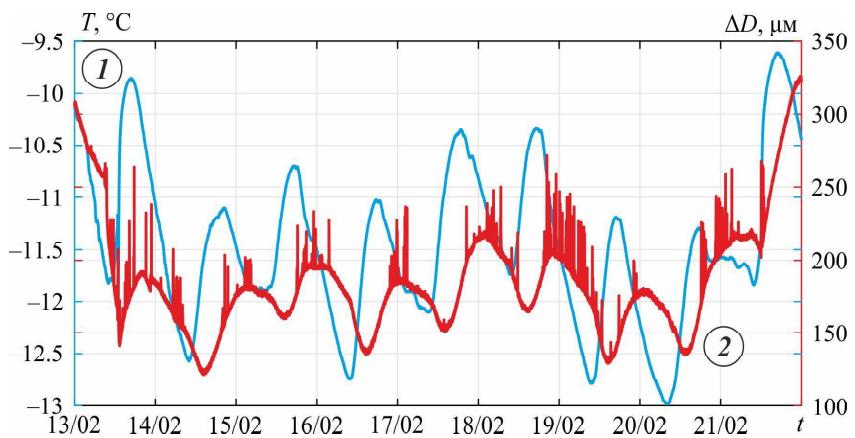


Рис. 6. Вариации температуры (1) и деформации льда (2) в нише на глубине 0,4 м 13.02.2020–21.02.2020 / Fig. 6 Variations in temperature (1) and ice deformation (2) in a niche at a depth of 0.4 m from 13.02.2020 to 21.02.2020

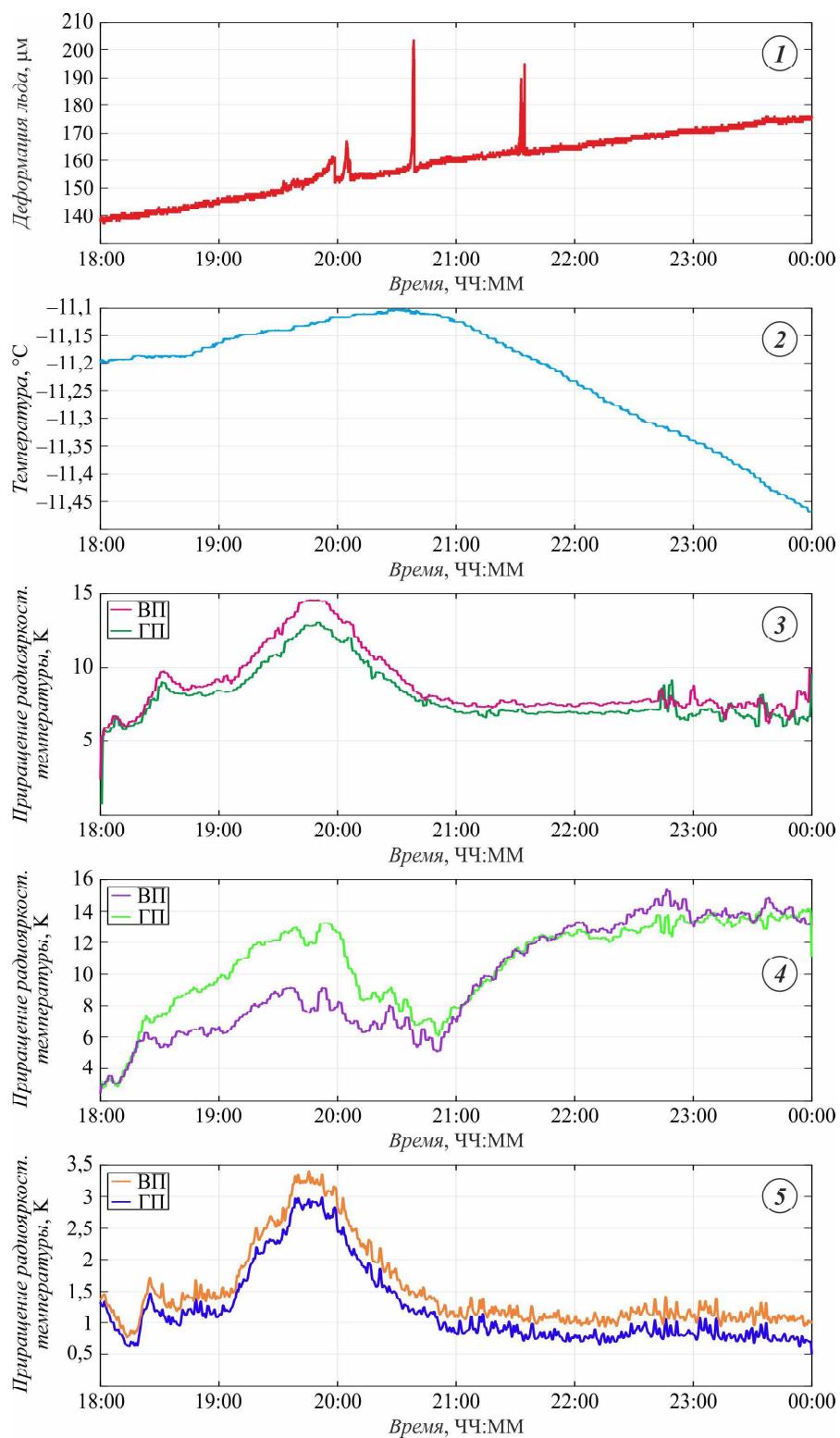


Рис. 7. Вариации сигналов контактного комплекса и дистанционных СВЧ-каналов 14 февраля 2020 г. в период 18:00...24:00: деформации (1) и температуры (2) на глубине 40 см; приращений радиояркостной температуры на волне 8 мм (3), 14 мм (4) и радиометра R2 (5) / Fig. 7. Variations of the signals of the contact complex and remote microwave channels 14.02.2020 from 18:00 to 24:00: strain (1) and temperature (2) at a depth of 40 cm; brightness temperature increments at a wavelength of 8 mm (3), 14 mm (4) and a radiometer R2 (5)

Исследования влияния деформации в верхнем слое ледяного покрова (скин-слое) на радиотепловое излучение выполнены в фоновом режиме, т. е. без воздействия прямых антропогенных факторов. Полученные результаты вариаций интенсивности радиотеплового излучения в дальнейшем будут использованы на практике как фоновые геоиндикаторы для исключения вклада суточного и сезонного колебания температуры и деформации при постановке экспериментов по оценке влияния прямых антропогенных факторов.

Заключение. Для оценки экологического состояния озера выявлены чувствительные геоиндикаторы сезонных изменений свойств ледяного покрова в фоновых условиях отсутствия воздействия на тестируемую площадку прямых антропогенных факторов:

1. Коэффициенты корреляции сигналов интенсивности радиотеплового излучения в

диапазоне длин волн 8 мм и 14 мм и данных с контактных датчиков деформации и температуры, установленных в верхнем слое ледяного покрова, при окне 1000 точек превышают $\pm 0,7$ и $\pm 0,9$ соответственно.

2. В период усиления образования трещин перед началом деструкции льда в канале R1.4 получены приращения радиояркостной температуры, достигающие значений 3...6 К.

Полученные результаты позволят разработать модель и использовать фоновые вариации интенсивности радиотеплового излучения ледяного покрова в период трещинообразования для исключения вклада суточных и сезонных проявлений деформации и трещинообразования при постановке эксперимента по тестированию влияния антропогенных факторов.

Список литературы

1. Алексеев П. В., Викторов А. С., Волков А. М., Гончаров А. К., Гордон З. И., Данекин А. И., Кочерров С. А., Некрасов В. В., Пахомов Л. А., Прохоров Ю. П., Феоктистов А. А., Хапин Ю. Б. Микроволновый сканирующий радиометр интегрального влажностного зондирования атмосферы (МИВЗА) // Исследование Земли из космоса. 2003. № 5. С. 68–77.
2. Бордонский Г. С. Причины возникновения становых трещин в ледяных покровах озер // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 69–76.
3. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Различие картин радарных и радиометрических измерений (на примере ледяного покрова эвтрофированного озера) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 2. С. 228–240.
4. Бордонский Г. С., Рябова Л. Д. Радиочастотный дифференциальный измеритель деформации // Ученые записки Забайкальского государственного университета. 2015. № 3. С. 26–29.
5. Венславский В. Б., Гершензон В. Е., Громов В. К., Семенов С. С., Энтин З. Е., Эткин В. С. Вариации интенсивности собственного и рассеянного СВЧ излучения при настильных углах зондирования океана в поле поверхностных проявлений внутренних волн // Исследования Земли из космоса. 1987. № 5. С. 30–34.
6. Караев В. Ю., Панфилов М. А., Мешков Е. М., Баландина Г. Н., Андреева З. В., Максимов А. А. Использование данных двухчастотного дождевого радиолокатора для мониторинга формирования и разрушения ледяного покрова на озере Байкал в осенне-зимний период 2015–2016 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 1. С. 206–220.
7. Раев М. Д., Шарков Е. А. Исследования окружающей среды радиофизическими методами. История создания и становления направления «Радиофизические спутниковые исследования Земли» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 33–52.
8. Ружич В. В., Псахье С. Г., Черных Е. Н., Борняков С. А., Гранин Н. Г. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 3. С. 289–299.
9. Смахтин В. К. Ледовый режим озер Забайкалья в условиях современного потепления // Лед и снег. 2018. Т. 58, № 2. С. 225–230.
10. Тихонов В. В., Хвостов И. В., Романов А. Н., Шарков Е. А. Анализ изменений ледяного покрова пресноводных водоемов по данным SMOS // Исследование Земли из космоса. 2017. № 6. С. 46–53.
11. Хвостов И. В., Романов А. Н., Тихонов В. В., Шарков Е. А. Некоторые особенности микроволнового радиотеплового излучения пресноводных водоемов с ледяным покровом // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 4. С. 149–154.
12. Цыренжапов С. В., Гурулев А. А. Тепловые деформации и радиояркостная температура ледяного покрова пресноводных водоемов // Лед и Снег. 2020. № 60. С. 445–452.

13. 34970A. Система сбора данных / коммутации (Agilent Technologies). URL: <https://www.astena.ru/34970a.html> (дата обращения: 18.03.2020). Текст: электронный.
14. Domine F., Taillandier A.-S., Simpson W. R. A parameterization of the specific surface area of seasonal snow for field use and for models of snowpack evolution // Journal of geophysical research. 2007. Vol. 112, No. F2. P. F02031.
15. Sharkov E. A. Passive microwave remote sensing of the Earth: physical foundations. Springer: PRAXIS, 2003. 612 p.
16. Staroszczyk R. Floating ice plate failure due to its thermal expansion at the surface // Ocean Engineering. 2018. Vol. 158. P. 331–337.

References

1. Alekseev P. V., Viktorov A. S., Volkov A. M., Goncharov A. K., Gordon Z. I., Danekin A. I., Kocherov S. A., Nekrasov V. V., Pakhomov L. A., Prohorov Yu. P., Feoktistov A. A., Khapin Yu. B. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* (Research of the Earth from Space), 2003, no. 5, pp. 68–77.
2. Bordonsky G. S. *Geografiya i prirodnye resursy* (Geography and Natural Resources), 2007, no. 2, pp. 69–76.
3. Bordonsky G. S., Gurulev A. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V., *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Current problems in remote sensing of the Earth from space), 2014, vol. 11, no. 2, pp. 149–154.
4. Bordonsky G. S., Ryabova L. D. *Uchenye zapiski Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* (Scientific notes Transbaikal State University), 2015, no. 3, pp. 26–29.
5. Venslavsky V. B., Gershenson V. E., Gromov V. K., Semenov S. S., Ekhntin Z. E., Ekhtkin V. S. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* (Research of the Earth from Space), 1987, no. 5, pp. 30–34.
6. Karaev V. Yu., Panfilov M. A., Meshkov E. M., Balandina G. N., Andreeva Z. V., Maksimov A. A. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Current problems in remote sensing of the Earth from space), 2018, vol. 15, no. 1, pp. 206–220.
7. Raev M. D., Sharkov E. A. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Current problems in remote sensing of the Earth from space), 2015, vol. 12, no. 5, pp. 33–52.
8. Ruzhich V. V., Psahe S. G., Chernykh E. N., Bornyakov S. A., Granin N. G. *Geologiya i geofizika* (Russian Geology and Geophysics), 2009, vol. 50, no. 3, pp. 289–299.
9. Smahtin V. K. *Led i sneg* (Ice and Snow), 2018, vol. 58, no. 2, pp. 225–230.
10. Tikhonov V. V., Khvostov I. V., Romanov A. N., Sharkov E. A. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* (Research of the Earth from Space), 2017, no. 6, pp. 46–53.
11. Khvostov I. V., Romanov A. N., Tikhonov V. V., Sharkov E. A. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Current problems in remote sensing of the Earth from space), 2017, vol. 14, no. 4, pp. 149–154.
12. Tsyrenzhapov S. V., Gurulev A. A. *Led i Sneg* (Ice and Snow), 2020, no. 60, pp. 445–452.
13. 34970A. *Sistema sbora dannyh kommutatsii* (34970A. Data Acquisition / Switching System) (Agilent Technologies). URL: <https://www.astena.ru/34970a.html> (Date of access: 18.02.2020). Text: electronic.
14. Domine F., Taillandier A.-S., Simpson W. R. *Journal of geophysical research* (Journal of geophysical research), 2007, vol. 112, no. F2, pp. F02031/13.
15. Sharkov E. A. *Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations* (Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations). Springer: PRAXIS, 2003. 612 p.
16. Staroszczyk R. *Ocean Engineering* (Ocean Engineering), 2018, vol. 158, pp. 331–337.

Коротко об авторах

Венславский Владимир Борисович, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры математики и информатики, Забайкальский государственный университет; науч. сотрудник, лаборатория геофизики криогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия. Область научных интересов: радиофизика, дистанционное зондирование
venslav-vb@mail.ru

Орлов Алексей Олегович, канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник, лаборатория геофизики криогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия. Область научных интересов: радиофизика, дистанционное зондирование, криогенные объекты, конденсированные среды
Orlov_A_O@mail.ru

Харин Юрий Владимирович, инженер, лаборатория геофизики криогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия. Область научных интересов: радиофизика, дистанционное зондирование, криогенные объекты, конденсированные среды

Briefly about the authors _____

Vladimir Venslavsky, candidate of physico-mathematical sciences, associate professor, Mathematics and Computer Science department, Transbaikal State University; Scientific Employee, Cryogenesis Geophysics Laboratory, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of SB RAS, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: radiophysics, remote sensing,

Aleksey Orlov, candidate of physico-mathematical sciences, scientific employee, Cryogenesis Geophysics Laboratory, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of SB RAS, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: radiophysics, remote sensing, cryogenic objects, condensed matter

Yuriy Kharin, engineer, Cryogenesis Geophysics Laboratory, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of SB RAS, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: radiophysics, remote sensing, cryogenic objects, condensed matter

Образец цитирования _____

Венславский В. Б., Орлов А. О., Харин Ю. В. Радиотепловое излучение ледяного покрова озера Арахлей как геоиндикатор изменения водного объекта // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 7. С. 6–16. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-6-16.

Venslavsky V., Orlov A., Kharin Yu. Radiothermal radiation of the ice cover of the Arakhley lake as a geo-indicator of changes in a water body // Transbaikal State University Journal, 2020, vol. 26, no. 7, pp. 6–16. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-6-16.

Статья поступила в редакцию: 26.06.2020 г.

Статья принята к публикации: 03.09.2020 г.