

ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

PROBLEMS OF MATHEMATICAL PHYSICS. ANALYTICAL METHODS

УДК 537.877

DOI: 10.21209/2658-7114-2021-16-3-59-68

*Александр Александрович Гурулев¹,
кандидат физико-математических наук,
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
(672014, Россия, г. Чита, Недорезова, 16а),
e-mail: lgc255@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-2232-3583>*

*Сергей Васильевич Цыренжапов²,
младший научный сотрудник,
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
(672014, Россия, г. Чита, Недорезова, 16а),
e-mail: lgc255@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-7590-5619>*

*Юрий Владимирович Харин³,
инженер,
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
(672014, Россия, г. Чита, Недорезова, 16а),
e-mail: lgc255@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-5554-5081>*

*Вячеслав Андреевич Казанцев⁴,
техник,
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
(672014, Россия, г. Чита, Недорезова, 16а),
e-mail: lgc255@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-7539-1796>*

Особенности распространения микроволнового излучения в пресном ледяном покрове

При просвечивании пресного ледяного покрова в микроволновом диапазоне на частоте 13 ГГц исследовали мощность проходящего излучения на четырёх линейных поляризациях (вертикальной, горизонтальной и на поляризациях, повёрнутых под углом $\pm 45^\circ$) в

¹ А. А. Гурулев систематизировал материал статьи.

² С. В. Цыренжапов систематизировал материал статьи.

³ Ю. В. Харин проводил натурные полевые исследования.

⁴ В. А. Казанцев проводил натурные полевые исследования.

течение длительного промежутка времени. Измерения выполнялись на ледяном покрове оз. Арахлей (Забайкальский край) на расстоянии 120 м от берега в марте 2021 г. Проводились измерения внешних параметров исследуемой среды, а именно температуры ледяного покрова, метеопараметров (скорость ветра, температура воздуха, давление). Дистанция между генератором и приёмником электромагнитного излучения составила 40 м. Ориентация приборов – запад – восток. В результате были обнаружены вариации мощности проходящего микроволнового излучения. Эти вариации связаны с температурными деформациями ледяного покрова, которые были зафиксированы с помощью датчика деформации, установленного в ледяной покров. Выявленна особенность, которая наблюдалась и ранее в весенний период времени: различное временное поведение первого параметра Стокса, который определялся суммой мощностей двух ортогональных поляризаций, а именно, суммой принимаемых сигналов на вертикальной и горизонтальной поляризациях, и суммой принимаемых сигналов двух поляризаций, повернутых под углом $+45^\circ$ и -45° . Выявленное отличие в параметрах Стокса связывается с температурными деформациями пресного ледяного покрова в весенний период времени.

Ключевые слова: микроволновый диапазон, пресный ледяной покров, параметры Стокса, температурная деформация

Введение. Исследование мёрзлых сред методом радиопросвечивания используется для решения широкого круга задач [1; 2]. Так, например, с помощью методов радиолокации пресного ледяного щита Антарктиды были определены подлёдные озера [3]. Для выявления различных образований в криосферных средах необходимы знания их диэлектрических свойств, которые также влияют на скорость распространения электромагнитной волны в таких объектах [4].

Оптимальным методом исследования электромагнитных свойств льда является его изучение в естественных условиях без разрушения. Примером может являться исследование льда с помощью радиопросвечивания, когда приёмная и передающая аппаратура устанавливается непосредственно в ледяной покров. При этом методе исследования сохраняются условия природного существования ледяного покрова без его разрушения, что позволяет исследовать временную эволюцию, например, деградацию природного объекта в зависимости от внешних условий, таких как температура среды, внешнее давление, освещение поверхности среды, деформации и т. д.

С помощью распространения радиоволн в микроволновом диапазоне в пресном ледяном покрове был обнаружен эффект пространственной дисперсии в микроволновом диапазоне, который был впервые рассмотрен в работах нобелевского лауреата В. Л. Гинзбурга [5; 6]. Наиболее ярко этот эффект проявляется в возникновении добавочных волн с той же поляризацией, что и исходная, но с другим значением волнового вектора, что и было обнаружено по изучению поляризационных особенностей проходящего излучения сквозь пресный ледяной покров. Причиной возникновения добавочных некогерентных электромагнитных волн во льду является существование периодической структуры, к появлению которой могут привести механические напряжения и пластическая деформация [5]. Измерение распространения микроволнового излучения позволяет наблюдать течение ледяной структуры.

Таким образом, при радиопросвечивании ледяного покрова можно выявлять особенности строения ледяного покрова, а также процессы, происходящие в нем, что является актуальным для дистанционного зондирования льда. Также эти исследования имеют практическую ценность для специалистов, чей род деятельности связан с изучением процессов происходящих в криосферных образованиях.

Методика эксперимента. Исследование электромагнитных свойств пресного ледяного покрова при его радиопросвечивании выполняли на оз. Арахлей (Забайкальский край), которое расположено в сорока километрах от г. Читы на высоте 965 м от уровня моря [7]. Как было показано в предыдущих работах по радиопросвечиванию пресного ледяного покрова [8] оптимальным временем наблюдения, когда наблюдаются заметные вариации мощности проходящего излучения в микроволновом диапазоне, является период времени перед началом деструкции ледяного покрова, то есть февраль-март месяцы. В этот период времени прекращается активный рост ледяного покрова и начинается процесс его разрушения. Измерения по изучению электромагнитных свойств пресного льда были выполнены в середине марта 2021 года. Суть измерений состояла в следующем.

В ледяной покров на глубину 40 см от его поверхности помещался генератор электромагнитного излучения на частоту излучения 13 ГГц на диоде Ганна. Излучение осуществлялось на вертикальной поляризации (ВП). На расстоянии 40 м от генератора в направлении на запад располагался радиометрический приемник на ту же длину волны. Прием осуществлялся на четырех линейных поляризациях: горизонтальная (ГП), вертикальная, и поляризации, повернутые под углом $\pm 45^\circ$ к ним ($+45^\circ$ и -45°). Схема эксперимента приведена на рис. 1.

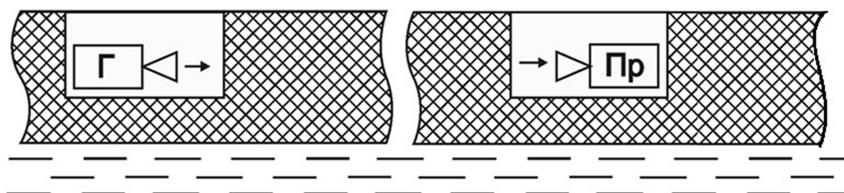


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по радиопросвечиванию ледяного покрова на частоте излучения 13 ГГц; Г и Пр – генератор и приёмник электромагнитного излучения

Fig. 1. Schematic of an experimental setup for radiotransmission of an ice cover at a radiation frequency of 13 GHz: Г and Пр – generator and receiver of electromagnetic radiation

В момент измерений толщина ледяного покрова составляла ~ 150 см, толщина снежного покрова не превышала 10 см. Минерализация льда – около 1 мг/кг при минерализации исходной воды водоёма 120 мг/л. В месте, где проводились измерения, расстояние от нижней поверхности ледяного покрова до дна составляло около 40 см. Запись с выхода радиометрического приемника осуществлялась системой сбора данных фирмы *Agilent*. Радиометрический приёмник и генератор электромагнитного излучения были терmostатированы.

Выполнялись измерения деформации ледяного покрова в направлении север-юг и восток-запад. Схема экспериментальной установки и её принципиальная схема указана в работах [9–11]. Глубина, на которой располагался датчик деформации в ледяном

покрове, составляла 20 см. Кроме того, выполнялась запись температуры внутри ледяного покрова на различных глубинах (5, 10, 15, 20 см) и над его поверхностью. Датчиками температуры служили калиброванные кремневые диоды.

Метеорологические параметры воздушной среды (температура воздуха, атмосферное давление воздуха, скорость ветра и относительная влажность) осуществлялись на берегу оз. Арахлей в с. Преображенка на стационаре Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН на расстоянии 130 м. от места измерений.

Результаты исследования и их обсуждение. Непрерывные измерения проводились в течение трёх суток. В качестве примера приведены результаты полученных данных с 18:00 до 24:00 10 марта 2021 года.

Температура воздуха в этот день изменялась от 0 °C в дневное время и до –10 °C в ночное время. По этой причине наблюдалось повышение температуры внутри ледяного покрова до 20:00 в верхнем слое ледяного покрова, а затем шло ее понижение. Причем в результате тепловой инерции максимальный пик температуры льда на разных глубинах достигается в разное время, что и показано на рис. 2. Также видно, что с глубиной приращение температуры за это время уменьшается. На глубине 5 см приращение между максимальным и минимальным значением температуры составляет ~0,6 °C, а уже на глубине 20 см ~0,2 °C. Если суточные вариации температуры воздуха существенны, то дневные вариации температуры во льду достигают больших значений и составляют ~5 °C (в случае разницы дневных и ночных температур воздуха 20 °C). В связи с этим ледяной покров претерпевает существенные температурные напряжения в верхнем слое, в отличие от более глубоких слоев льда, которые приводят к деформациям ледяного покрова.

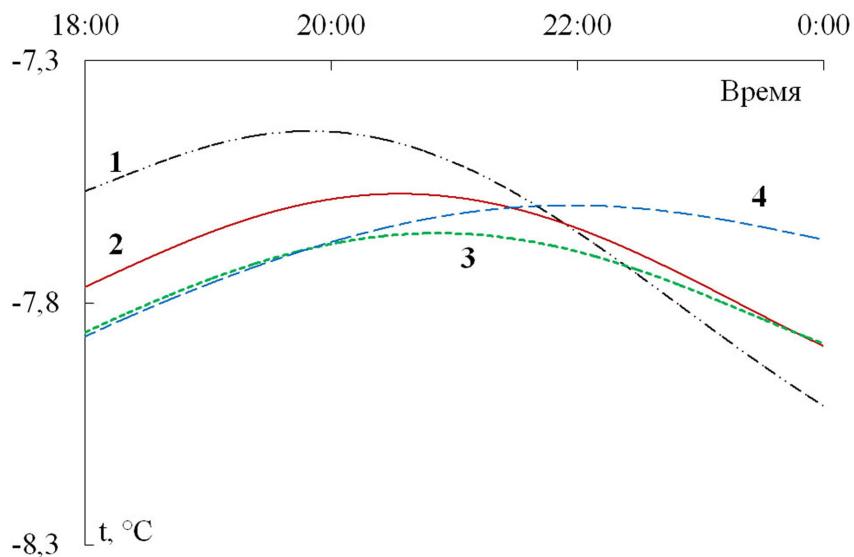


Рис. 2. Изменение термодинамической температуры (t) внутри ледяного покрова на разных глубинах: 1 – 5 см, 2 – 10 см, 3 – 15 см, 4 – 20 см. Оз. Арахлей. 10 марта 2021 г.

Fig. 2. Change in thermodynamic temperature (t) inside the ice cover at different depths: 1 – 5 cm, 2 – 10 cm, 3 – 15 cm, 4 – 20 cm. Lake Arakhley. March 10, 2021

Регистрируемое изменение расстояния (1) на длине датчиков 1 м. в направлении юг-север и запад-восток показано на рис. 3.

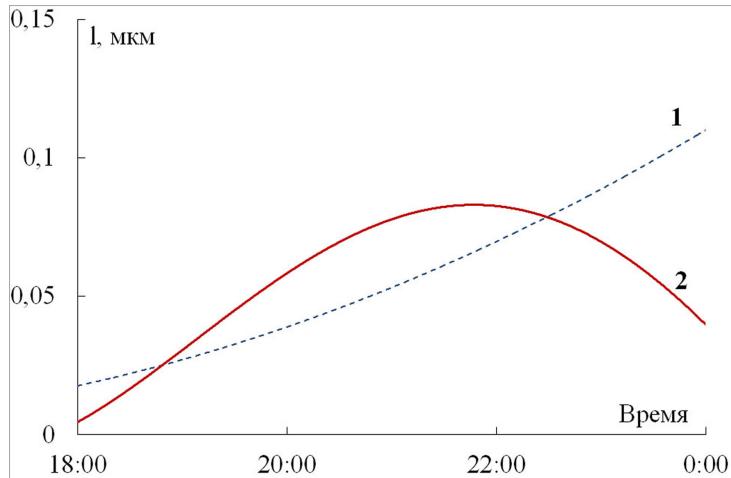


Рис. 3. Регистрируемая деформация (l) верхних слоёв пресного ледяного покрова в направлении 1 – север – юг, 2 – запад – восток. Оз. Арахлей. 10 марта 2021 г.

Fig. 3. Recorded deformation (l) of the upper layers of the fresh ice cover in the direction 1 – North-South, 2 – West-East. Lake Arakhley. March 10, 2021

Как видно из приведённых графиков, в направлении параллельном береговой линии озера (север – юг) наблюдали суточный экстремум деформации, а в перпендикулярном направлении (запад – восток) изменение деформации похоже на температурный тренд внутри ледяного покрова на той же глубине, на которой располагался датчик деформации ледяного покрова (~ 20 см от поверхности льда). Таким образом, растяжение ледяного покрова имеет более сложный характер. Оно зависит от выбранного направления, температуры льда и других параметров, например, такого как, направление главной кристаллографической оси кристалла льда (ось С).

Результаты измерений, мощности прошедшего сквозь ледяной покров электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне показаны на рис. 4.

Как видно из приведенных графиков, наблюдаются вариации мощности проходящего излучения сквозь ледяной покров. Следует отметить, что сигналы ведут себя по-разному для различных видов поляризации, а именно, на ГП и $+45^\circ$ временной ход проходящей мощности излучения совпадает с временным ходом деформации ледяного покрова. В то время как на ВП и -45° температурной зависимости проходящей мощности излучения не наблюдается. Для описания состояния поляризаций электромагнитных волн принято использовать параметры Стокса (четыре параметра Стокса), три из которых можно определить из полученных линейных поляризаций в данном исследовании. Первый параметр Стокса характеризует полную мощность проходящего излучения и определяется как сумма двух ортогональных поляризаций, либо ГП и ВП (первый способ), либо $+45^\circ$ и -45° (второй способ). Если рассчитать параметры Стокса по первому и второму способу (из рис. 4), то будет выявлено, что они имеют различный временной ход, чего не должно наблюдаться для обычных кристаллов. Этот эффект связывается с наличием добавочных электромагнитных волн, возникающих в результате существования пространственной дисперсии в ледяном покрове, при распространении в нем электромагнитной волны [5].

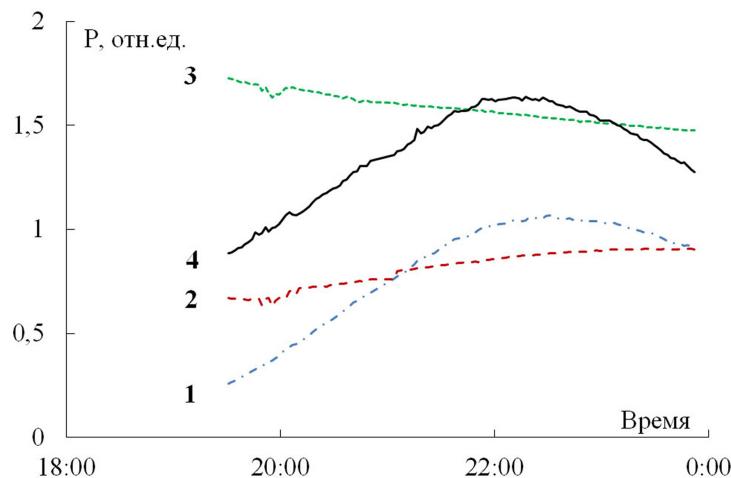


Рис. 4. Изменение проходящей мощности микроволнового излучения (Р в отн. ед.) в ледяном покрове. Излучение на ВП, приём излучения на: 1 – плюс 45°, 2 – ВП, 3 – минус 45°, 4 – ГП. Оз. Арахлей. 10 марта 2021 г.

Fig. 4. Change in the transmitted power of microwave radiation (P in rel. Units) in the ice cover. Radiation at the VP, and the reception of radiation at: 1 – (+45°), 2 – VP, 3 – (-45°), 4 – GP. Lake Arakhley. March 10, 2021

Выводы. Таким образом, в нашей работе экспериментально было обнаружено влияние термической деформации ледяного покрова на мощность проходящего микроволнового излучения в нем. Наибольший эффект возникает при разогреве верхних слоев льда, которые в ночное время имеют более низкую температуру. Этот эффект необходимо учитывать при радиолокационном исследовании пресных ледяных покровов [12; 13] и при исследовании других криосферных образований.

Список литературы

1. Мачерет Ю. Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
2. Лаврентьев И. И., Глазовский А. Ф., Мачерет Ю. Я., Мацковский В. В., Муравьев А. Я. Запасы льда в ледниках на Земле Норденшельда (Шпицберген) и их изменения за последние десятилетия // Лёд и снег. 2019. Т. 59, № 1. С. 23–38. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-23-38.
3. Popov S. V. Fifty-five years of Russian radio-echo sounding investigations in Antarctica // Annals of Glaciology. 2020. Vol. 61, Iss. 81. C. 14–24. DOI: 10.1017/aog.2020.4.
4. Котляков В. М., Мачерет Ю. Я., Сосновский А. В., Глазовский А. Ф. Скорость распространения радиоволн в сухом и влажном снежном покрове // Лёд и снег. 2017. Т. 57, № 1. С. 45–56. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56.
5. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Поляризационные аномалии микроволнового излучения и добавочные электромагнитные волны в деформируемых ледяных покровах // Журнал технической физики. 2011. Т. 81, № 9. С. 93–99.
6. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д., Цыренжапов С. В. Изучение волн Гинзбурга–Пекара в ледяных покровах в микроволновом диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 1. С. 267–272.

7. Итигилова М. Ц., Пронин Н. М., Юргенсон Г. А., Птицын А. Б., Калугин И. А., Дарьин А. В., Решетова С. А., Обязов В. А., Помазкова Н. В., Цыбекмитова Г. Ц., Михеев И. Е., Фалейчик Л. М., Замана Л. В., Субботина В. Н., Корякина Е. А., Куклин А. П., Матафонов П. В., Ташлыкова Н. А., Базарова Б. Б., Соколов А. В. Ивано-Арахлейские озера на рубеже веков (состояние и динамика). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 337 с.
8. Бордонский Г. С., Гурулев А. А. Проявление автоволн пластического течения в пресном льду при микроволновых измерениях // Письма в Журнал технической физики. 2019. Т. 45, № 6. С. 40–42. DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47499.17645.
9. Цыренжапов С. В., Гурулев А. А. Тепловые деформации и радиояркостная температура ледяного покрова пресных водоёмов // Лёд и снег. 2020. Т. 60, № 3. С. 445–452. DOI: 10.31857/S2076673420030051.
10. Бордонский Г. С., Рябова Л. Д. Радиочастотный дифференциальный измеритель деформации // Ученые записки Забайкальского государственного университета. 2015. № 3. С. 26–29.
11. 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.
12. Кирбиженкова И. И., Чимитдоржиев Т. Н., Тубанов Ц. А., Татьков Г. И., Захаров А. И., Быков М. Е., Дмитриев А. В., Филатов А. В., Евтушкин А. В. Результаты исследований динамики ледового покрова озера Байкал методами спутниковой радиолокации ALOS PALSAR и GPS-навигации // Вестник Бурятского научного центра СО РАН. 2012. № 1. С. 42–59.
13. 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.

Статья поступила в редакцию 21.05.2020; принята к публикации 24.06.2020.

Библиографическое описание статьи

Гурулев А. А., Цыренжапов С. В., Харин Ю. В., Казанцев В. А. Особенности распространения микроволнового излучения в пресном ледяном покрове // Ученые записки Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 16, № 3. С. 59–68. DOI: 10.21209/2658-7114-2021-16-3-59-68.

Aleksandr A. Gurulev¹,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,

Senior Scientific Employee,

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology

Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

(26, Butina str., Chita, 672000, Russia),

e-mail: lgc255@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0003-2232-3583>

Sergey V. Tsyrenzhapov²,

Junior Scientific Employee,

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology

Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

(26, Butina str., Chita, 672000, Russia),

e-mail: lgc255@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-7590-5619>

Yuriy V. Kharin³,

Engineer,

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology

Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

(26, Butina str., Chita, 672000, Russia),

e-mail: lgc255@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-5554-5081>

Vyacheslav A. Kazantsev⁴,

Technician,

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology

Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

(26, Butina str., Chita, 672000, Russia),

e-mail: lgc255@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-7539-1796>

Features of the Propagation of Microwave Radiation in a Freshwater Ice Cover

When scanning fresh ice cover in the microwave range at a frequency of 13 GHz, the transmitted radiation power was investigated at four linear polarizations (vertical, horizontal, and polarizations rotated at an angle of $\pm 45^\circ$) for a long period of time. The measurements were carried out on the ice cover of the lake Arakhley (Transbaikal region) at a distance of 120 m from the coast in March 2021. We also measured the external parameters of the studied environment, namely, the temperature of the ice cover, meteorological parameters (wind speed, air temperature, pressure). The distance between the generator and the receiver of electromagnetic radiation

¹ A. A. Gurulev systematized the material of the article.

² S. V. Tsyrenzhapov systematized the material of the article.

³ Yu. V. Kharin writing the text of the article, conducting field research.

⁴ V. A. Kazantsev writing the text of the article, carrying out field studies.

was 40 meters. The orientation of the instruments is West-East. As a result, variations in the power of the transmitted microwave radiation were detected. These variations are related to the temperature deformations of the ice cover, which were recorded using a deformation sensor installed in the ice cover. Also revealed a feature that was observed earlier in the spring. This is a different temporal behavior of the first Stokes parameter, which is determined by the sum of the powers of two orthogonal polarizations, namely, the sum of the received signals at the vertical and horizontal polarizations, and the sum of the received signals of the two polarizations rotated at an angle of $+45^\circ$ and -45° . This difference is also associated with temperature deformations of the fresh ice cover in the spring.

Keywords: microwave range, fresh ice cover, Stokes parameters, temperature deformation

References

1. Macheret, Yu. Ya. Radiosounding of glaciers. M.: Nauchnyj mir, 2006 (In Rus.)
2. Lavrentiv, I. I., Glazovskij A F., Macheret Yu. Ya., Mackovskij V. V., Murav'ev A. Ya. Reserve of ice in glaciers on the Nordenskild Land, Spitsbergen, and their changes over the last decades. Led i sneg, no. 59, pp. 23–38. 2019. (In Rus.). DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-23-38.
3. Popov, S. V. Fifty-five years of Russian radio-echo sounding investigations in Antarctica. Annals of Glaciology, no. 61, pp. 14–24. 2020. DOI: 10.1017/aog.2020.4.
4. Kotlyakov, V. M., Macheret Yu. Ya., Sosnovskij A. V., Glazovskij A. F. Speed of radio wave propagation in dry and wet snow. Led i Sneg, no. 57, iss. 1, pp. 45–56. 2017. (In Rus.). DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56.
5. Bordonsky, G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D., Orlov A. O., Tsyrenzhapov, S. V. Polarization anomalies of microwave radiation and additional electromagnetic waves in deformable ice covers. Technical Physics, no. 56, pp. 1314–1319. 2011.
6. Bordonsky, G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D., Cyrenzhapov S. V. Study of Ginzburg-Pekar waves in ice sheets in the microwave range. Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, no. 4, pp. 267–272, 2007. (In Rus.)
7. Itigilova, M. C., Pronin N. M., Yurgenson G. A., Pticyn A. B., Kalugin I. A., Dar'in A. V., Reshetova S. A., Obyazov V. A., Pomazkova N. V., Cybekmitova G. C., Miheev I. E., Falejchik L. M., Zamana L. V., Subbotina V. N., Koryakina E. A., Kuklin A. P., Matafonov P. V., Tashlykova N. A., Bazarova B. B., Sokolov A. V. Ivano-Arakhleyskie lakes at the turn of the century (state and dynamics). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2013. (In Rus.)
8. Bordonskii, G. S., Gurulev A. A. Plastic flow autowaves in freshwater ice as manifested by microwave reflection measurements. Technical Physics Letters, no. 45, pp. 285–287. 2019. (In Rus.). DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47499.17645.
9. Tzyrenzhapov, S. V., Gurulev A. A. Thermal deformations and brightness temperature of the ice cover of freshwater bodies. Led i sneg, no. 60, pp. 445–452. 2020. (In Rus.). DOI: 10.31857/S2076673420030051.
10. Bordonskiy, G. S., Ryabova L. D. The RF differential strain gauge. Uchenye zapiski ZabGU, no. 3, pp. 26–29. 2015. (In Rus.)
11. Venslavsky, V. B., Orlov A. O., Harin Yu. V. Radiothermal radiation of the ice cover of the Arakhley lake as a geo-indicator of changes in a water body. Vestnik Zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta, no. 26, pp. 6–16, 2020. (In Rus.). DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-6-16.

12. Kirbizhekova, I. I., Chimitdorzhiev T. N., Tubanov C. A., Tat'kov G. I., Zaharov A. I., Bykov M. E., Dmitriev A. V., Filatov A. V., Evtyushkin A. V. The results of lake Baikal ice cover dynamics research by methods of Alos Palsar satellite radar-location and GPS-navigation. Vestnik Buryatskogo nauch. centra SO RAN, no. 1, pp. 42–59, 2012. (In Rus.)
13. Ruzhich, V. V., Chernykh E. N., Bornyakov S. A., Psakhie S. G., Granin N. G. Deformation and seismic effects in the ice cover of lake Baikal. Russian Geology and Geophysics, no. 50, pp. 214–221, 2009.

Received: May 21, 2021; accepted for publication June 24, 2021

Reference to article

Gurulev A. A., Tsyrenzhapov S. V., Kharin Yu. V., Kazantsev V. A. Features of the Propagation of Microwave Radiation in a Freshwater Ice Cover // Scholarly Notes of Transbaikal State University. 2021. Vol. 16, No. 3. PP. 59–68. DOI: 10.21209/2658-7114-2020-16-3-59-68.