

УДК 550.34

## О ПОДОБИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕД ЛЕДОВЫМИ УДАРАМИ И ТЕКТОНИЧЕСКИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

© 2023 г. С. А. Борняков<sup>1,\*</sup>, А. А. Добрынина<sup>1</sup>, А. Н. Шагун<sup>1</sup>, В. А. Саньков<sup>1</sup>, Д. В. Салко<sup>1</sup>, А. И. Мирошниченко<sup>1</sup>, Г. В. Встовский<sup>2</sup>, А. Е. Синцов<sup>3</sup>

Представлено академиком РАН Е.И. Гордеевым 06.12.2022 г.

Поступило 06.12.2022 г.

После доработки 19.12.2022 г.

Принято к публикации 22.12.2022 г.

По результатам инструментального мониторинга ледового покрова озера Байкал обнаружен автоволновой характер реализации деформаций льда перед ледовыми ударами. Появляясь за минуты-первые десятки минут до удара этот процесс развивается с увеличением амплитуды колебаний, нередко с кратным сокращением их периода. Автоволновая динамика деформаций ледового покрова является следствием его самоорганизации как структурно-неоднородной среды критическом состоянии. Наличие самоорганизации деформационного процесса подтверждается результатами обработки временных рядов данных методом анализа кривизны структурных функций (МАКСФ) и методом спектрального анализа на основе периодограммы Ломба-Скаргла. Анализ данных сейсмического мониторинга ледового покрова показал, что автоволновые процессы характеризуются постоянными частотами 0.1 Гц. С учетом выявленных особенностей реализации деформаций и микросейсмических колебаний льда перед ледовыми ударами выполнен спектральный анализ данных деформационного и сейсмического мониторинга на Бугульдейском геодинамическом полигоне перед Кударинским землетрясением. Анализ показал, что за 14 ч до него на сейсмограмме наблюдается постепенно увеличение амплитуд автоколебаний в частотном диапазоне от 0.01 до 0.1 Гц. Максимальное увеличение амплитуд составляет 19.5 относительно фона.

*Ключевые слова:* лед, деформация, автоколебания, ледовый удар, землетрясение, предвестники

DOI: 10.31857/S2686739722602903, EDN: NZQUET

Ледовый покров оз. Байкал при медленных нагрузках проявляет реологические свойства, сходные со свойствами литосферы при длительном действии на нее напряжений, что делает возможным его использование для моделирования сейсмотектонических процессов [1].

В сильные морозы в ледовом покрове формируются многокилометровые стантовые трещины отрыва (рис. 1 а, б). В дальнейшем они работают в режиме “открытие–закрытие” при вариациях отрицательных температур воздуха. В весенний период, преимущественно в первой половине марта, при резких потеплениях в дневное время ледовый покров существенно увеличивает свой объем

за счет температурного расширения, что приводит к росту в нем тангенциальных напряжений сжатия, под действием которых контакт между ледовыми пластинами в стантовой трещине разрушается с последующим поддвиганием одной пластины под другую (рис. 1 в, г). Амплитуда одноактного поддвигания определяется величиной дневного перепада температуры и обычно составляет от первых десятков сантиметров до первых метров, а суммарная амплитуда такого поддвига, накопленная за несколько дней, может достигать 25–30 м.

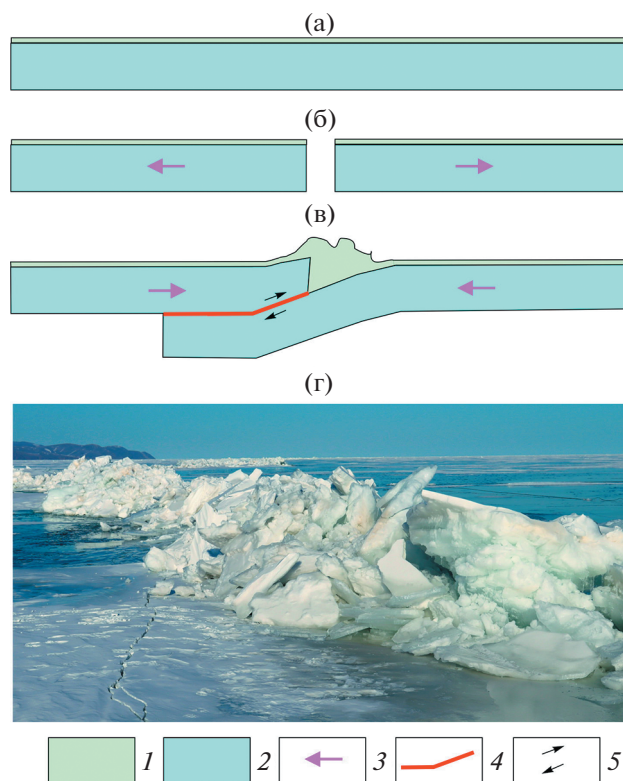
Процесс первичного формирования подвига, а также последующие активизации по механизму “stick-slip” периодически сменяющегося контакта между ледовыми пластинами сопровождаются сейсмическими эффектами, традиционно называемые “ледовыми ударами”. Естественная природа ледовых ударов, подготовка и реализация которых протекают на небольших временных интервалах, измеряемых первыми часами, делает их уникальным объектом для инструментальных наблюдений, результаты которых, с учетом сходства реологических свойств ледового покрова и лито-

<sup>1</sup> Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных конструкций им. Н.П. Мельникова, Москва, Россия

<sup>3</sup> Открытое акционерное общество “Безопасность”, Москва, Россия

\*E-mail: bornyak@crust.irk.ru



**Рис. 1.** Схематичное отображение формирования в ледовом покрове (а) становой трещины отрыва (б), последующей ее трансформации в подвиг при термальном расширении льда (в). г – Фото сформировавшейся зоны подвига в ледовом покрове оз. Байкал. 1 – снег; 2 – лед; 3 – направление перемещения ледовых пластин; 4 – периодически активизирующийся контакт между ледовыми пластинами; 5 – направление относительного перемещения ледовых пластин при активизации контакта между ними.

сферы, могут быть использованы для разработки способов средне- и краткосрочного прогноза тектонических землетрясений [1–3].

Авторами выполнен инструментальный мониторинг деформаций и сейсмических колебаний ледового покрова оз. Байкал в пределах становой трещины в районе поселка Бугульдейка в 4 км от берега (координаты  $52^{\circ}31'06.27''$  с.ш.,  $106^{\circ}13'06.72''$  в.д.). Мониторинг проводился инструментальным комплексом авторской разработки [4]. Деформации измерялись штанговыми датчиками с базой 2 м с дискретностью 4 Гц. Датчики располагались перпендикулярно простирающую становой трещины на расстоянии 15 м от нее. Сейсмические колебания регистрировались сейсмостанциями “Байкал-7HR” с датчиками “СК-1”.

Важным результатом выполненного мониторинга явилось обнаружение автоволнового характера реализации деформаций льда перед ледовыми ударами (рис. 2 а). Появляясь за минуты-первые десятки минут до удара, этот процесс развивается с увеличением амплитуды колебаний, нередко с кратным сокращением их периода (рис. 2 б, в). Непосредственно перед ударом такой

упорядоченный характер колебаний сменяется хаотическим с увеличением их амплитуды и периода.

Автоволновая динамика деформаций ледового покрова обусловлена его способностью к самоорганизации как открытой, структурно-неоднородной системы в критическом состоянии [5, 6]. Известные результаты моделирования [7] и результаты инструментальных наблюдений за разрушением ледника в горной местности [8], демонстрирующие автоволновую динамику деформаций нагруженных структурно-неоднородных систем при напряжениях, близких к пределу их прочности, позволяют считать зафиксированное нами аналогичное явление закономерным, не связанным с особенностями деформации ледового покрова, лежащего на воде, а обусловленным способностью этих систем к самоорганизации в таком критическом состоянии.

Наличие самоорганизации деформационного процесса косвенно подтверждается результатами обработки временных рядов деформаций ледового покрова методом анализа кривизн структурных функций (МАКСФ) [9] и методом спектрального анализа на основе периодограммы Ломба-

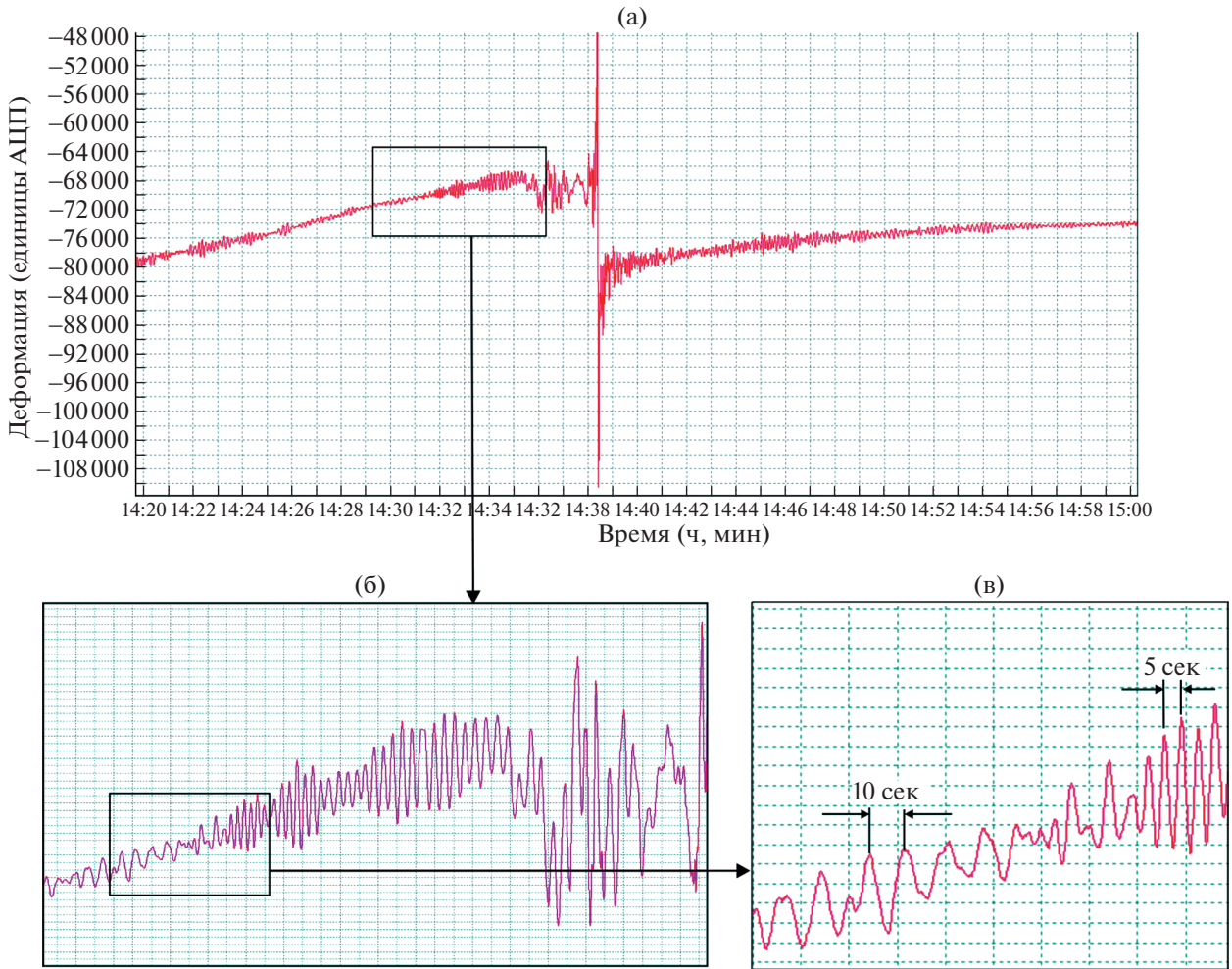


Рис. 2. Пример автоволнового характера реализации деформаций льда перед ледовым ударом (а) и его детали (б, в).

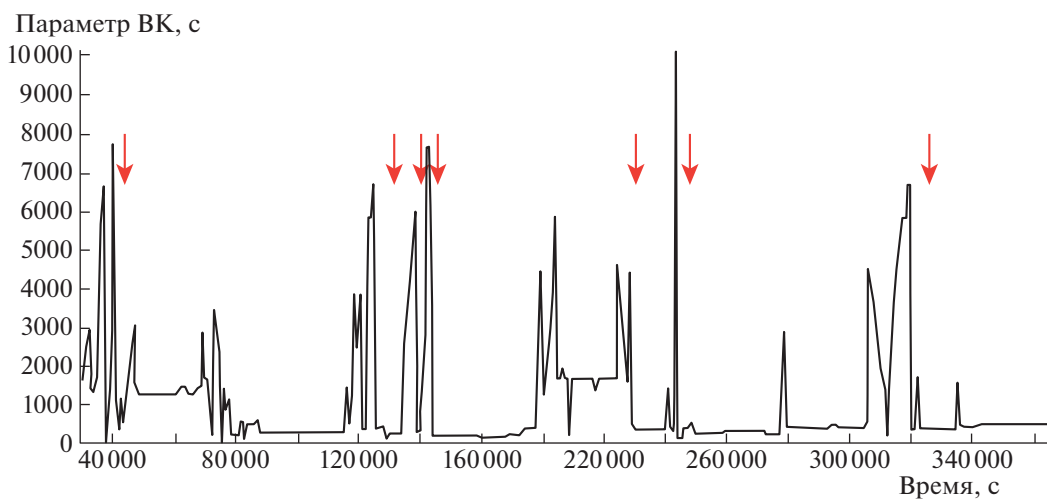
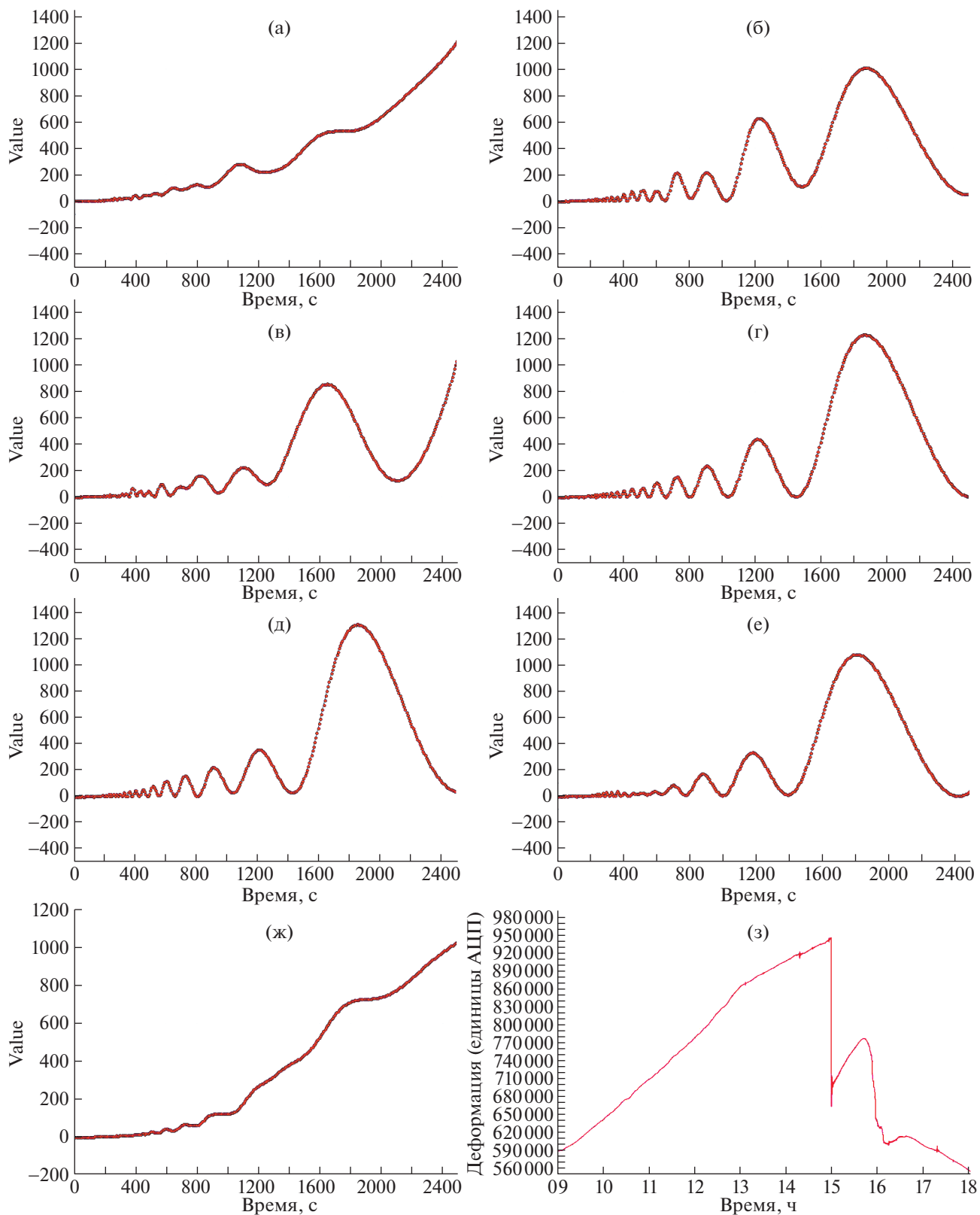
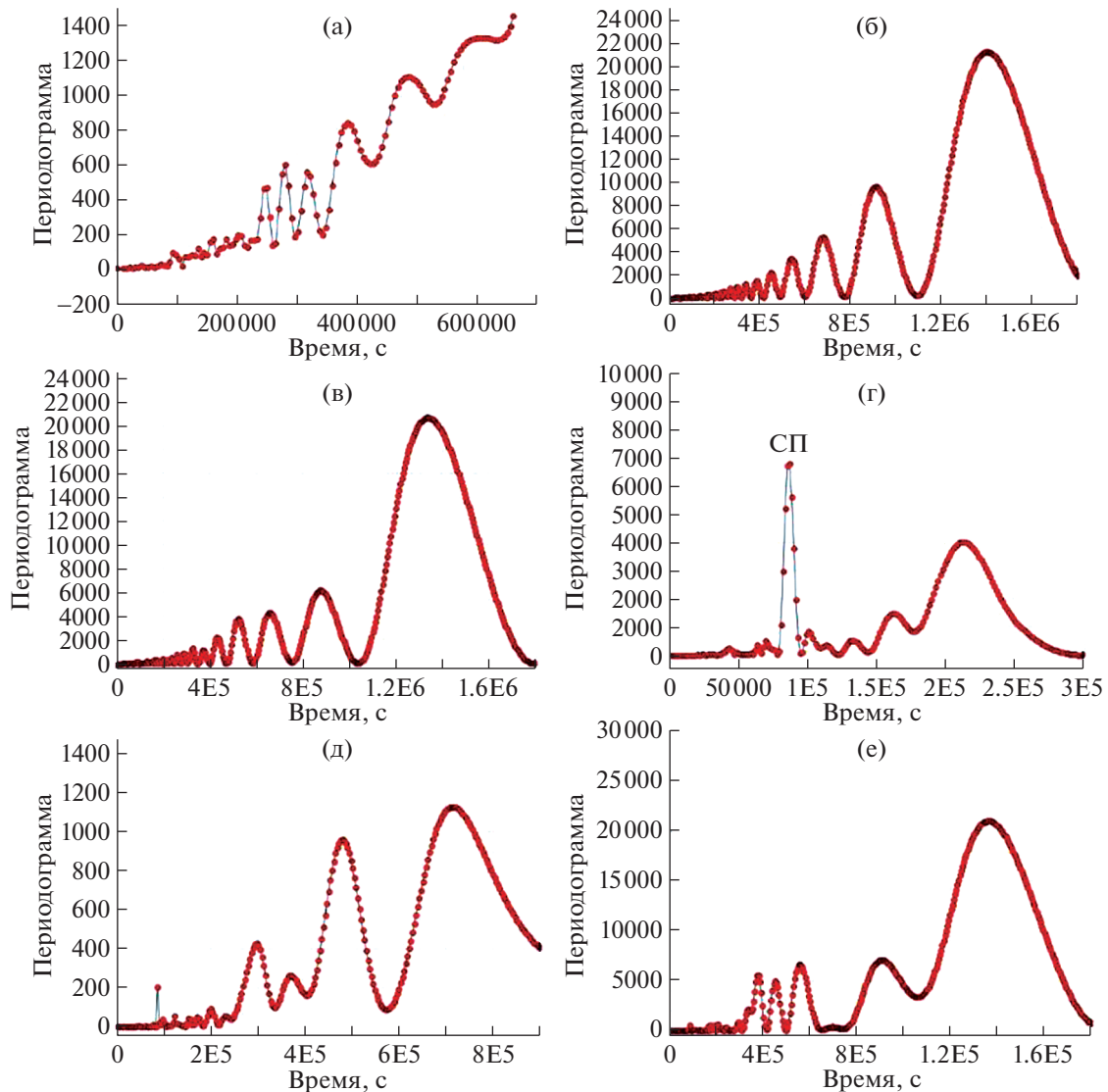


Рис. 3. График вариаций параметра “время корреляции” в течение 8, 9, 10 и 11 марта. Стрелками отмечены моменты реализации наиболее сильных ледовых ударов.



**Рис. 4.** Спектрограммы временного ряда деформаций ледового покрова с 9 ч до 16 ч 07 марта 2021 г. для почасовых интервалов: 9–10 ч (а); 10–11 ч (б); 11–12 ч (в); 12–13 ч (г); 13–14 ч (д); 14–15 ч (е); 15–16 ч (ж). з – графическое отображение исходных данных.



**Рис. 5.** Результаты спектрального анализа данных деформаций горных пород в пункте Бугульдейка для временных интервалов: 1–30 сентября (а), 1–31 октября (б), 1–30 ноября (в), 1–9 декабря (г), 11–31 декабря (д), 1–31 января, 2020 (е).

Скаргла [9–11]. Оба метода позволяют выделять в рядах данных деформаций временные интервалы их коррелированного поведения, т.е. интервалы, в пределах которых имела место самоорганизация деформационного процесса.

В первом случае таким интервалам соответствует резкий рост параметра “время корреляции” (ВК) (рис. 3). Как видно из графика, в большинстве случаев наиболее сильным ледовым ударам, помеченным красными стрелками, предшествует проявление самоорганизации деформационного процесса.

В случае спектрального анализа, временным интервалам, в пределах которых имела место самоорганизация, соответствуют упорядоченные спектрограммы, отражающие скоррелированный характер колебаний в деформационном процессе (рис. 4 г, д, е). Вне этих интервалов спектрограммы имеют хаотический характер (рис. 4 а, б, в, ж).

По результатам сейсмического мониторинга ледового покрова установлено, что автоволновые процессы, предвещающие ледовые удары, в среднем имеют частоту 0.1 Гц. Непосредственно во время ледового удара реализуются несколько колебаний большой амплитуды с частотами 0.6–1.2 Гц. Длительность этих колебаний составляет порядка 10 с.

С учетом выявленных особенностей реализации деформаций и микросейсмических колебаний льда перед ледовыми ударами выполнен аналогичный анализ данных деформационного и сейсмического мониторинга на геодинамическом полигоне Бугульдейка перед Кударинским землетрясением 09.12.2020 г. ( $M_w = 5.5$ ). Полигон расположен напротив его эпицентра на Западном берегу Байкала рядом с одноименным поселком (координаты:  $52.567^\circ$  с.ш.,  $106.136^\circ$  в.д.).

Для спектрального анализа данных деформационного мониторинга временной ряд был разбит на следующие интервалы: 1–30 июня; 1–31 июля, 1–31 августа; 1–20 сентября – 22–30 сентября – 1–30 октября (рис. 4).

Приведенные спектрограммы показывают, что структура и интенсивность осцилляций меняются во времени, что наиболее отчетливо проявлено на периодах в интервале их значений от E5 до E6. На первой спектрограмме в этом интервале насчитывается четыре основных периода со значениями параметра “периодограмма” более 1000 (рис. 5 а). В следующий временной интервал количество основных периодов увеличивается до пяти, за счет появления дополнительного периода 1.6E6. При этом значения параметра “периодограмма” возрастают в два раза на фоне усиления хаотизации спектрограммы (рис. 5 б). В третий интервал количество основных периодов осцилляций со значениями параметра “периодограмма” более 1000 увеличивается до восьми, а структуре спектрограммы проявляется упорядоченность (рис. 5 в), аналогичная выше представленной на рисунке 4 г и 4 д. В последующий, предсейсмогенный интервал, эта упорядоченность сохраняется на фоне увеличения параметра “периодограмма” более чем в два раза (рис. 5 г). После землетрясения структура спектра перестраивается. В последнюю декаду сентября значимой остается только большепериодная осцилляция 4E5 (рис. 5 д). В последующий расчетный период происходит существенное снижение параметра “периодограмма”, а спектрограмма имеет неупорядоченную структуру с преобладанием веса малопериодных осцилляций (рис. 5 е).

Спектральный анализ микросейсмических шумов до и после Кударинского землетрясения показал, что за 14 ч до него на сейсмограмме наблюдается постепенно увеличение амплитуд автоколебаний в частотном диапазоне от 0.01 до 0.1 Гц. Максимальное увеличение амплитуд составляет 19.5 относительно фона. Увеличение фона наблюдалось также в течение 9 ч после главного толчка. Поляризационный анализ микросейсмического шума показал четко выраженную ориентацию колебаний в юго-восточном направлении (средний азимут – 121°), что хорошо согласуется с азимутом на эпицентр основного толчка – 124.6°. Анализ сейсмограмм за предыдущий период (с 01 декабря) и через 10 ч после Кударинского землетрясения подобных эффектов в поле микросейсмических шумов не выявил.

Таким образом, из приведенных результатов следует, что низкочастотные автоволновые колебания, зарегистрированные перед ледовыми ударами, имели место и перед Кударинским землетрясением. Это позволяет рассматривать их как

устойчиво проявляющийся процесс, предшествующий сейсмогенной подвижке по разлому.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований и Государственным фондом естественных наук Китая в рамках научного проекта № 21-55-53019 с использованием Уникальной научной установки (УНУ) “Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добрецов Н.Л., Псахье С.Г., Ружич В.В., Попов В.Л., Шилько Е.В., Гранин Н.Г., Тимофеев В.Ю., Астафуров С.В., Димаки А.В., Старчевич Я. Ледовый покров озера Байкал как модельная среда для изучения тектонических процессов в земной коре // ДАН. 2007. Т. 412. № 5. С. 656–660.
2. Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Димаки А.В., Ружич В.В., Панченко А.Ю. Модельные исследования процессов возникновения и развития деформационных структур субдукционного типа в ледовом покрове озера Байкал // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 55–65.
3. 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.
4. Салко Д.В., Борняков С.А. Автоматизированная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах // Приборы. 2014. № 6. С. 24–28.
5. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.
6. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 460 с.
7. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
8. Pralong A. Oscillations in critical shearing: fpplications to fractures in glaciers // Nonlin. Processes Geophes. 2006. V. 13. P. 681–683.
9. Vstovsky G.V. Factual revelation of correlation lengths hierarchy in micro- and nanostructures by scanning probe microscopy data // Mater. Sci. 2006. V. 12. P. 262–270.
10. Lomb N.R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data // Astrophys. Sp. Sci. 1976. V. 39. P. 447–462. <https://doi.org/10.1007/BF00648343>
11. Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. 2. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // The Astrophysical Journal. 1982. V. 263. P. 835–853.
12. Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. 3. Fourier transforms. Autocorrelation function and cross-correlation functions of unevenly spaced data // The Astrophysical Journal. 1989. V. 343. P. 874–887. <https://doi.org/10.1086/167757>



## ON SIMILARITIES BETWEEN DEFORMATION PROCESSES PRECEDING ICE SHOCKS AND TECTONIC EARTHQUAKES

S. A. Bornyakov<sup>a,#</sup>, A. A. Dobrynina<sup>a</sup>, A. N. Shagun<sup>a</sup>, V. A. Sankov<sup>a</sup>, D. V. Salko<sup>a</sup>,  
A. I. Miroshnichenko<sup>a</sup>, G. V. Vstovsky<sup>b</sup>, and A. E. Sintsov<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Melnikov Central Research and Design Institute of Building Structures, Moscow, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Open Joint Stock Company "Safety", Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: bornyak@crust.irk.ru*

Presented by Academician of the RAS E.I. Gordeev December 6, 2022

The instrumental monitoring reveals an autowave nature of ice deformation behavior prior to ice shocks. A few minutes or the first tens of minutes before the shock, this process shows an increase in the amplitude of oscillations, often with a multi-fold reduction in their period. An autowave dynamics of ice deformations is due to self-organization of a structurally heterogeneous ice environment under critical conditions. The self-organization ability of the deformation process is confirmed by the results of ice deformation time series processing by the structural function curvature analysis method (SFCAM) and by the Lomb-Scargle periodogram method. The results of seismic monitoring of ice showed that autowave processes are characterized by constant frequency of 0.1 Hz. Taking into account the ice deformation and microseismic fluctuation features preceding the ice shocks, spectral analysis was performed on the data of deformation and seismicity monitoring at the Buguldeika geodynamic polygon before the Kudara earthquake. According to the results, 14 hours before the earthquake the seismogram recorded a gradual increase in auto-oscillation amplitudes in the frequency range from 0.01 to 0.1 Hz. The maximum amplitude increase is 19.5 against the background.

*Keywords:* ice, deformation, self-oscillation, ice impact, earthquake, precursors