

УДК 551.326.85

**О БЛИЗКИХ К ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ СВОЙСТВ
СТАТИСТИКИ ИЗМЕРЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЛЬДА ОЗЕРА
БАЙКАЛ ПЕРЕД МОМЕНТОМ ЛЕДОВОГО РАЗЛОМА**

Коган Лев Петрович^{1,2,3}, к.ф.-м.н., доцент кафедры Общей физики и теоретической механики ННГАСУ

e-mail: L_kog@list.ru

Вольвач Александр Евгеньевич², д.ф.-м.н., Отдел радиоастрономии и геодинамики

e-mail: volvach@craocrimea.ru

Борняков Сергей Александрович⁴, к.ф.-м.н.

e-mail: voe@inbox.ru

¹ Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

² Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п.г.т. Научный, республика Крым, Россия

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

⁴ Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

Аннотация. Анализируются статистические свойства измерений механического напряжения ледового покрова озера Байкал перед моментом ледового удара, произошедшего 25 февраля 2022 года. Применяемый подход позволяет выявлять статистические феномены, которые с высокой вероятностью возникают перед весенними ледовыми разломами на Байкале и могут интерпретироваться как их краткосрочные предвестники. В исследуемых статистических зависимостях обнаружена серия статистических феноменов высокой степени детерминированности.

Ключевые слова: ледовые удары, механическое напряжение, статистический функционал, предвестники.

**ON NEAR-DETERMINISTIC CHANGES IN THE STATISTICAL PROPERTIES OF
MECHANICAL STRESS MEASUREMENTS IN THE ICE OF LAKE BAIKAL PRIOR
TO THE ICE FRACTURE EVENT OF 6 MARCH 2022**

Lev P. Kogan^{1,2,3}, Associate Professor of the Department of General Physics and Theoretical Mechanics at the Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

e-mail: L_kog@list.ru

Alexander E. Volvach², Department of Radio Astronomy and Geodynamics, Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences

e-mail: a-volvach@list.ru

Sergey A. Bornyakov⁴, Ph.D., Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

e-mail: voe@inbox.ru

¹ Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

² Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Scientific urban-type settlement, Republic of Crimea, Russia

³ Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia

⁴ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. This study examines changes in the statistical properties of mechanical stress measurements in the ice cover of Lake Baikal prior to the ice-shock event that occurred on 6 March 2022. The applied approach makes it possible to investigate statistical phenomena that are highly likely to arise before spring ice fractures on Baikal and therefore may be interpreted as their short-term precursors. In the analyzed statistical dependencies, within time intervals of approximately fifteen to twenty minutes preceding the investigated ice event, a sequence of statistical phenomena with a high degree of determinism was identified.

Keywords: ice strikes, mechanical stress, statistical functionality, harbingers.

В этой статье при помощи методики спектрально-вероятностного анализа [1-3] рассматриваются изменения свойства статистики измерений (в единицах паскалей) механического сдвливания $x(t)$ льда озера Байкал на интервале времени от 01:00:00 до 04:32:00 25 февраля 2022 года (время UTC). Изучение подобных событий актуально в связи с высокой энергией, выделяющейся при таких ударах – их воздействие эквивалентно землетрясению с магнитудой $M \sim (3 \div 4)$. Измерения были проведены при помощи пьезоэлектрического датчика, погруженного в лед. Указанный промежуток времени включает момент первого ледового удара, который произошел в 04:16:45. Для выявления статистических феноменов, рассматриваемых в роли предвестников этого события, применен статистический функционал, который ранее был введен и апробирован в [1-3]:

$$L_0(\mu) = \frac{A}{M} \sum_{l=\mu-M+1}^{\mu} |\mathcal{L}_l|, \quad \mathcal{L}_l = \sum_{m=0}^{N-1} (-1)^m P_{m,l}. \quad (1)$$

В (1) аргумент μ отвечает моменту времени завершения отрезка реализации с таким номером, множитель $A = 1000$ введен для перехода к более удобному для анализа диапазону значений функционала $L_0(\mu)$, значение M определяет ширину интервала усреднения, которое проводится по последовательным отрезкам реализации с одной и той же продолжительностью и равным числом отсчетов N_1 , обладающим номерами в диапазоне от $\mu - M + 1$ и до μ . При этом множитель $P_{m,l}$ (где второй индекс l есть номер отрезка реализации) равен эмпирически полученной вероятности попадания значений указанной выше нелинейной функции $F[x(t)] = \sin[\xi x(t)]$ (здесь $\xi = 1 \text{ Па}^{-1}$ – нормировочный множитель) от непосредственно измеряемых значений случайной величины $x(t)$ в $-l$ -й интервал области значений вида

$$\sin[\xi x(t)]_{\min} + mh \leq \sin[\xi x(t)] < \sin[\xi x(t)]_{\min} + (m+1)h, \quad (2) \\ 0 \leq m \leq N-1.$$

С целью пояснения укажем, что подобно [1-3] в этой статье вводится гипотеза о том, что реально измеряемую случайную величину $x(t)$ можем записать в виде суммы

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) \quad (3)$$

значений фонового шума $x_1(t)$ и соответственно дополнительного (независимого от фонового шума) случайного процесса $x_2(t)$, связанного с влиянием процесса подготовки приближающегося ледового события. При этом плотность вероятности $\rho(w)$ суммарного случайного процесса $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ может быть записана в виде свертки

$\rho(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_1(w - w')\rho_2(w')dw'$. Здесь $\rho_{1,2}(w)$ – вероятностные распределения для $x_{1,2}(t)$. Применение предлагаемой методики расчетов основано на том вероятностном эффекте, что с учетом конечного числа отсчетов плотность вероятности фонового шума $\rho_1(w)$ будет обладать случайными мелкомасштабными флуктуациями. Их эффективный период равен ширине интервала дискретизации h при составлении статистики вида (2) для непосредственных значений $x(t)$. Если ширина $2\sigma_2$ распределения $\rho_2(w)$ (где σ_2^2 – дисперсия для значений случайной величины x_2) удовлетворяет условию

$$2\sigma_2 \geq (2 \div 3)h \quad (4)$$

то с учетом указанной свертки эффективная амплитуда таких возмущений будет уменьшаться вследствие процесса усреднения [1-3]. Переход от прямо измеряемых значений $x(t)$ связан с тем, что отвечающая $\sin[\xi x(t)]$ плотность вероятности обладает интегрируемыми особенностями при $w \rightarrow \pm 1$. Их существование позволяет усилить отличие значений $L_0(\mu)$ (которое определяется отличием эффективной амплитуды указанных флуктуаций) для тех отрезков реализации, для которых в (3) слагаемое $x_2(t)$ существует и удовлетворяет (4), по сравнению с теми отрезками, для которых $x_2(t)$ мало или полностью отсутствует.

Далее для удобства проведения анализа вместо (1) будет рассматриваться зависимость $L(n) = L_0\left(\left[\frac{vn}{N_1}\right]\right)$. Здесь квадратные скобки означают целую часть числа, аргумент n отвечает времени в минутах от начала отсчета, значение N_1 есть число отсчетов в одном отрезке реализации, а множитель $v = 67.2 \cdot 60 = 4032$ равен числу измерений за одну минуту. (В данном случае учтено, что используемая аппаратура производит в среднем 67.2 отсчета за одну секунду.)

Методика анализа результатов измерений

При анализе статистических свойств измерений напряжения льда вводятся понятия, ранее примененные в [1-3]: локальные тренды, направляющие точки, каналы, скользящие границы, тестирование. Эти термины иллюстрируются на примере рис. 1. Здесь приведена типичная зависимость статистического функционала $L(n)$, построенная при двух наборах значений M , h , N_1 , указанных в подписи к рисунку. Зависимость $L(n)$ соответствует измерениям механического сдавливания прибрежного льда Байкала в указанный выше период времени. По горизонтальной оси отмечены дискретные значения времени n в минутах, которые отсчитываются от начала измерений. Сплошной вертикальной линией отмечен момент ледового удара в 4 часа 16 минут утра 25 февраля 2022 года. Введем несколько определений.

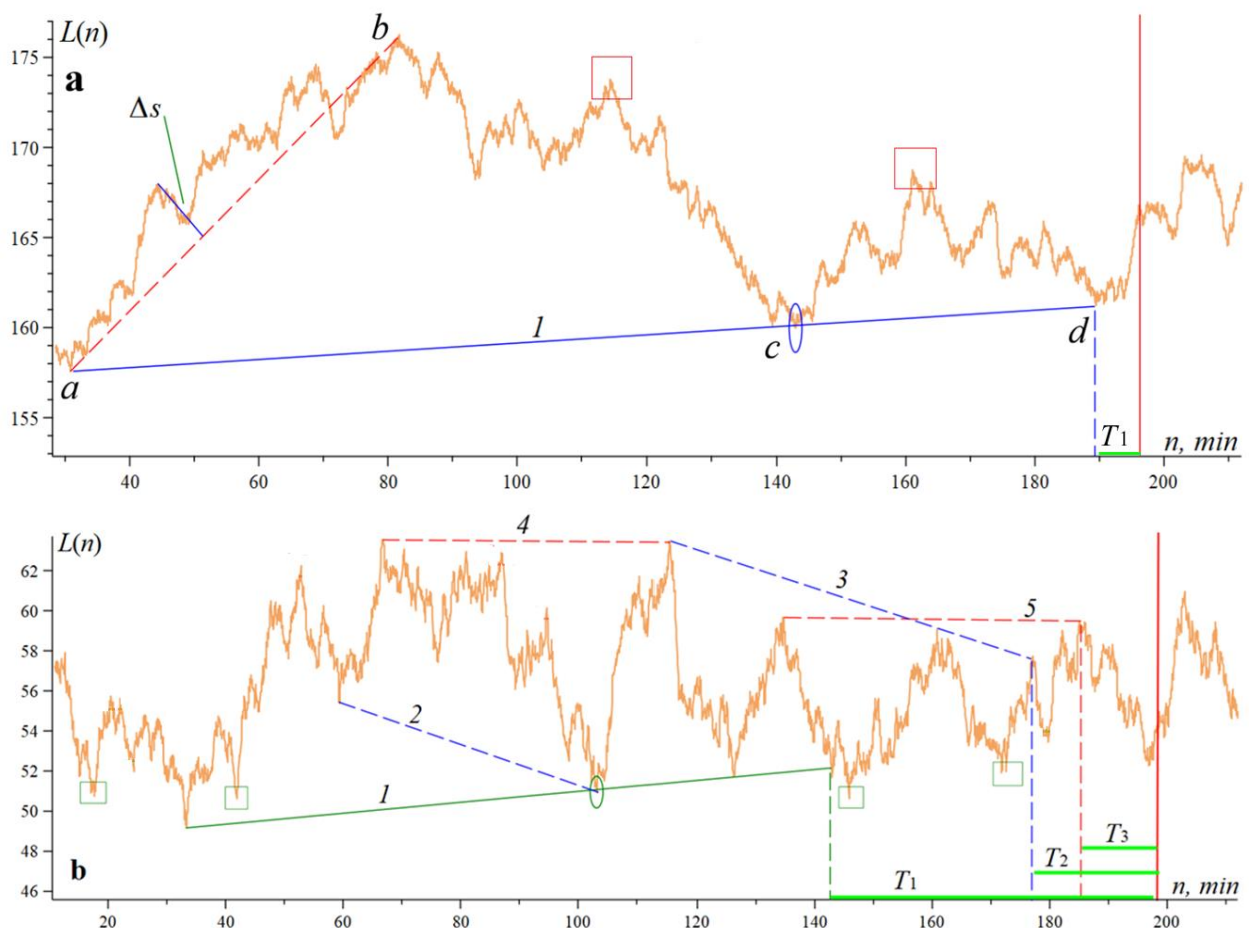


Рисунок 1 – Зависимость $L(n)$ при значениях $M = 1000$, $h = 0.075$, $N_1 = 120$ (a),
 $M = 200$, $h = 0.125$, $N_1 = 230$ (b)

Назовем *локальными трендами* участки зависимости $L(n)$, которые расположены между точками экстремумов этой кривой и отвечают вариациям δL (т.е. разностям значений функционала $L(n)$ в точках максимума и минимума), которые удовлетворяют условию $\delta L \geq 0.2 \Delta L_{\max}$. Здесь $\Delta L_{\max}$ – наибольшая вариация значений $L(n)$ для области от начала отсчета и до момента ледового удара, то есть разность значений наибольшего максимума и наименьшего минимума (точки a и соответственно b на рис. 1a) функционала $L(n)$, на указанном отрезке времени. Кроме того, принимаем, что геометрическое отклонение Δs кривой $L(n)$ от прямолинейного отрезка длиной Δl , соединяющего граничные точки данного локального тренда, удовлетворяет условию $\Delta s \leq 0.1 \Delta l$. На рис. 1 локальным трендом является, в частности, сегмент ab кривой $L(n)$; здесь же изображено расстояние Δs . Укажем, что все указанные расстояния, а также углы на декартовой плоскости $\{n, L(n)\}$ рассчитываются при нормировке горизонтальных координат на время от начала отсчета и до ледового удара, а вертикальных – на максимум $L(n)$ на указанном отрезке времени. Граничные точки локальных трендов будем называть *направляющими точками*. При этом вводится условие, что каждая такая точка по горизонтали удалена от ближайшей точки кривой $L(n)$ не менее, чем на интервал $\Delta n = 10$ минут.

Определим понятия *тестирования*, которое означает или пересечение в некоторой точке кривой $L(n)$ и некоторой прямой, или прохождение этой прямой на таком вертикальном расстоянии ΔL_t от направляющей точки с координатами $\{n_t, L(n_t)\}$, что для коэффициента отклонения $\delta = \frac{\Delta L_t}{L_t} \cdot 100\%$ выполняется условие

$$\delta \leq 1.2\% . \quad (5)$$

Скользящей границей назовем прямую, проведенную через две направляющие точки и тестируемую кривой $L(n)$ еще хотя бы в одной направляющей точке, при выполнении условия (5). Такие точки называются дополнительными и выделены сплошными эллипсами. Скользящими границами являются прямые 1 на рис. 1a и 1b. Примером дополнительной точки является точка с на рис. 1a.

Каналом назовем совокупность двух таких прямых, каждая из которых проведена через две направляющие точки, и при этом угол $\Delta\alpha$ между направлениями этих прямых удовлетворяет условию

$$\Delta\alpha \leq 1.4^\circ . \quad (6)$$

Каналами являются пары прямых 2–3 и 4–5 на рис. 1b.

В роли момента регистрации предвестника приближающегося ледового удара будем рассматривать время последнего (перед землетрясением) тестирования зависимостью $L(n)$ границ канала или линии скользящей границы, см. рис. 1. Эти точки отмечены вертикальными пунктирными прямыми.

На рис. 1a горизонтальный интервал $T_1 = 7$ мин. отвечает точке d последнего тестирования для скользящей границы 1. На рис. 1b интервалы $T_1 = 56$ мин., $T_2 = 19$ мин. и $T_3 = 12$ мин. отвечают точкам последнего тестирования для скользящей границы 1, каналов 2–3 и соответственно 4–5.

Укажем, что с целью демонстрации малого числа направляющих точек те из них, через которые на рис. 1 не проходят рассматриваемые линейные объекты высокого уровня детерминированности в виде каналов и скользящих границ, отмечены красными (точки максимумов кривой $L(n)$) или синими (точки минимумов $L(n)$) сплошными прямоугольными контурами.

Таким образом, при анализе рис. 1 приходим к выводу о высокой вероятности «тяготения» моментов последнего тестирования рассматриваемых линейных структур к времени реализации ледового удара. При этом отметим, что, как и в других рассматриваемых случаях, при введенных ограничениях общее число направляющих точек на интервале времени вплоть до момента события оказывается весьма мало (для рис. 1a оно равно 6, а для 1b составляет 13). Поэтому, как следует из простых расчетов, вероятность «просто случайного» возникновения указанных каналов с почти параллельными границами, оказывается очень малой. И столь же малой является вероятность «просто случайного» возникновения феномена скользящих границ, для которых отклонение от дополнительной точки заведомо удовлетворяет (5).

Следовательно, сам факт эффекта «тяготения» моментов последнего тестирования таких линейных объектов ко времени ледового события с высокой вероятностью свидетельствует об их связи с процессом его подготовки. Аргументом в пользу подобного вывода является и физический смысл функционала $L(n)$. Согласно [1-3], его значения являются обратно пропорциональными эффективной амплитуде независимого случайного слагаемого $x_2(t)$ в (3), которое считаем обусловленным влиянием процесса подготовки приближающегося события. При этом, в частности, скользящая граница интерпретируется как барьер, трехкратное тестирование которого является признаком перехода системы в критическое состояние, а канал – как аналогичное проявление колебаний системы в преддверии ее разрушения.

Таким образом, приходим к следующим выводам.

1. По мере приближения момента ледового удара в статистических зависимостях, построенных на основании проведенных измерений и подобных функционалу $L(n)$, с высокой вероятностью возникают квазилинейные объекты, подобные приведенным на рис. 1.
2. Моменты последнего тестирования кривой $L(n)$ границами этих объектов с высокой вероятностью «тяготеют» к времени реализации предстоящего ледового события.
3. В рамках предлагаемой методики удастся сформулировать специализированный язык, то есть совокупность логически непротиворечивых понятий и определений, с помощью которого оказывается возможным анализировать измеряемые процессы в режиме, близком к реальному времени.

Статья подготовлена при поддержке гранта «Фундамент будущего» Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета.

Список литературы:

1. Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H., et al. Changes in the properties of the statistics of physical and biophysical fields as earthquake precursor. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2022. – V. 108. – P. 106200. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.106200>
2. Вольвач А.Е., Коган Л.П., Канониди К.Х., и др. О возможной связи совокупности статистически выявляемых квазилинейных локальных трендов в вариациях параметров магнитного поля перед землетрясениями в сейсмоактивных зонах Черного моря, Кавказа и Западной Азии. Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13. – №. 5. – С. 1-11. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0680>.
3. Volvach A.E., Kogan L.P., Volvach L.N., Kanonidi K.H., 2026. Precursors the earthquake on February 6, 2023 on the Turkey. Natural Hazards. – 2026. – V. 122 №68. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07754-7>.

