

**ДЕФОРМАЦИИ И СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ****В.В. Ружич, С.Г. Псахье\*, Е.Н. Черных, С.А. Борняков, Н.Г. Гранин\*\****Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия**\* Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021, Томск, просп. Академический, 2/1, Россия**\*\* Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Уланбаторская, 3, Россия*

В течение трех лет проводился мониторинг сейсмических и деформационных характеристик ледяного покрова оз. Байкал, а также натурные эксперименты по определению механических свойств байкальского льда при испытаниях на одноосное сжатие и срез в условиях *in situ*. Установлены диапазон измеренных прочностных показателей на сжатие образцов и целиков льда  $\sigma = 0.2\text{—}1.9$  МПа и зависимость их прочности от температуры и структуры. Рассмотрены природные факторы, влияющие на условия деформирования и хрупкого разрушения, такие как изменения температуры воздуха, ветра, подледные течения, вариации атмосферного давления, местные землетрясения. На основании высокоточных измерений режимов смещений по ледовым трещинам построены графики деформационного поведения ледяного покрова, в том числе при эпизодах проявления динамических деструктивных процессов, названных ледовыми ударами. Путем сейсмометрических наблюдений со станции Байкал-12 впервые получены записи суточных изменений сейсмического фона, а также запись ледового удара, магнитуда которого составила  $M = 0.3\text{—}0.8$  ( $E = 10^4\text{—}10^5$  Дж), что сопоставимо с горными ударами средней силы или слабыми землетрясениями. Описаны условия подготовки ледовых ударов, динамика их проявления и последствия. С помощью подледных микровзрывов изучались параметры деформометрического и сейсмического отклика ледяного покрова на внешние динамические воздействия. Обоснован вывод о том, что природные условия деформирования и деструкции ледяного покрова оз. Байкал, с учетом его упруговязкопластических свойств, во многом подобны процессам, протекающим в тектоносфере Земли. При изучении ледовых деформаций выявлены благоприятные условия для крупномасштабного тектонофизического моделирования, что важно для решения фундаментальных научных проблем и повышения эффективности мер по снижению ущерба от сильных горных ударов и землетрясений.

*Ледяной покров, становые трещины, прочность, деформации, ледовый удар, динамическое воздействие, сейсмичность, физическое моделирование.*

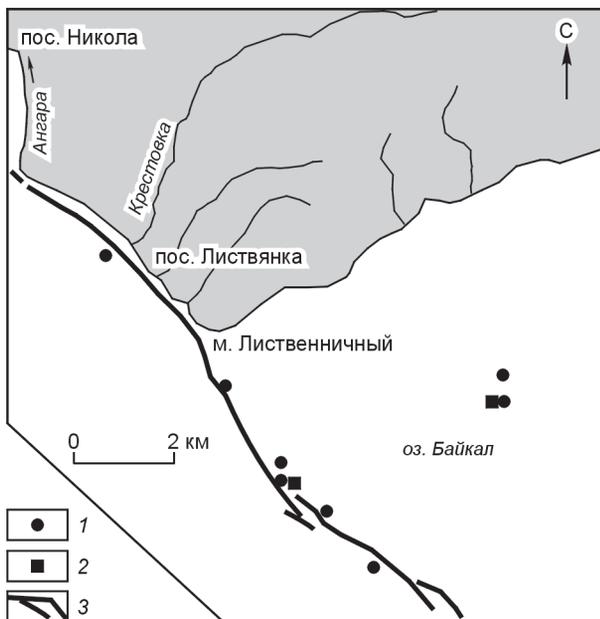
**DEFORMATION AND SEISMIC EFFECTS IN THE ICE COVER OF LAKE BAIKAL****V.V. Ruzhich, S.G. Psakhie, E.N. Chernykh, S.A. Bornyakov, N.G. Granin**

The mechanics of the ice cover of Lake Baikal has been studied through monitoring of its deformation and seismic effects and full-size uniaxial compression and shear tests in 2005—2007. We measured the shear strength of ice specimens and large *in situ* blocks ( $\sigma = 0.2\text{—}1.9$  MPa) and investigated it as a function of air temperature and ice structure. Deformation was analyzed in terms of various natural controls, such as air temperature and pressure, wind, sub-ice currents, and local earthquakes. Precise strain measurements along ice cracks were used to explore the strain behavior of ice, including the cases of dynamic failure (ice shocks). Measurements by seismic station Baikal-12 were used to monitor diurnal background microseismicity variations and to record an ice quake with its magnitude ( $M = 0.3\text{—}0.8$ ;  $E = 10^4\text{—}10^5$  J) comparable to a medium-size rock burst or a small earthquake. Ice quakes were studied in terms of their nucleation, dynamics, and aftereffects, as well as the strain and seismic responses of the ice, using sub-ice explosions in the latter case. The natural conditions of deformation in the elastoviscoplastic Baikal ice are similar to lithospheric processes and thus can be employed in tectonophysical modeling with scientific and practical implications for hazard mitigation.

*Ice cover, major crack, shear strength, deformation, ice shock, dynamic loading, seismicity, physical modeling*

**ВВЕДЕНИЕ**

Исследования проводились преимущественно на ледовом полигоне у истока Ангары вблизи пос. Листвянка (рис. 1). Ледяной покров Байкала издавна привлекал внимание специалистов как объект, имеющий ряд физических свойств, близких к разломно-блоковой геологической среде [Гаккель, 1959; Сокольников, 1960; Жданов и др., 2001, 2002; Псахье и др., 2005а,б; Добрецов и др., 2007]. Работы авторов проводились в течение 2005—2007 гг. в рамках интеграционного проекта, объединяющего специалистов шести научных институтов СО РАН в городах Иркутск, Томск, Новосибирск, Улан-Удэ. В работе изложены результаты проведенных исследований, при которых акцент сделан на изучение процессов



**Рис. 1. Схема расположения фрагмента Листвянской становой трещины в районе истока р. Ангары.**

1 — точки наблюдения, 2 — пункты сбора информации, 3 — Становая трещина.

естественного динамического разрушения ледяного покрова, порождающего сейсмические явления, которые обнаруживают много сходства с тектоническими землетрясениями. Наряду с выявлением структурных особенностей деформирования ледовых пластин (блоков) и физических свойств пресноводного ледяного покрова, были предприняты усилия по изучению динамических процессов в виде так называемых ледовых ударов, обнаруживающих много сходства с сеймотектоническими и сейсмическими процессами. Очень важными были результаты проведения непосредственно на льду испытаний с применением микровзрывов. На всех стадиях исследований использовались современные технические средства. Ниже приведены некоторые из

полученных результатов, которые с достаточным основанием можно отнести к разряду интересных, важных и оригинальных, поскольку опыт проведения подобных исследований, ориентированных на углубленное изучение динамики движений в трещинах и сейсмические явления в пресноводном льду Байкала, практически отсутствует.

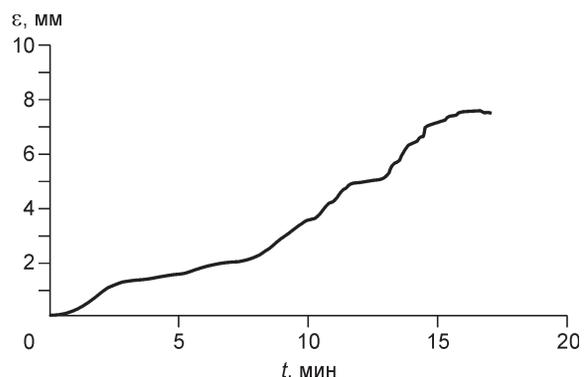
### ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БАЙКАЛЬСКОГО ЛЬДА

Ввиду отсутствия необходимых сведений о реологических свойствах байкальского льда была создана портативная аппаратура, которая позволяла проводить измерения в условиях равномерного одноосного сжатия со скоростью порядка 10 мкм/с. Изучались прочностные характеристики образцов и блоков льда в условиях сжатия и среза.

Разрушение выпиленных кубических образцов байкальского льда размером 5 см проводилось в зимних условиях *in situ*, т.е. на льду, с помощью специального домкрата при температуре воздуха в интервале от +1 °С до -11 °С. В результате были получены значения прочности на одноосное сжатие в диапазоне  $\sigma_{\text{н}} = 0.2—1.7$  МПа. Выявлена зависимость прочности образцов льда от его температуры. При температуре около 0 °С измеренная прочность  $\sigma_{\text{н}} = 0.2$  МПа, а при  $T = -11$  °С  $\sigma_{\text{н}} = 1.7$  МПа. Было установлено также, что наличие воздушных пузырьков, трещин, прослоев разнородного льда, включений частиц приводило к снижению прочностных показателей.

В условиях разрушения на срез цилиндрических столбиков льда высотой 5 см и диаметром 5 см были получены значения  $\sigma_{\text{н}} = 0.2—0.4$  МПа (при  $T = -6...-8$  °С). Вместе с этим проводилось разрушение мощными домкратами целиков льда, опиленных с трех сторон. Четвертая грань целиков и основания были оставлены в нетронутом состоянии снизу и с торца (размеры целика в см: высота 22, ширина — 64, длина — 70). При разрушении трех таких достаточно крупных образцов верхнего 22-сантиметрового слоя ледяного покрова были получены значения  $\sigma_{\text{н}} = 0.6—0.89$  МПа.

На рис. 2 приведен график деформирования ледяного целика вплоть до момента полного срыва в динамическом режиме при достижении предела прочности льда на срез. Важной особенностью льда можно считать проявление хрупкости и удароопасности, как у некоторых высокопрочных горных пород, склонных к выраженному хрупкому разрушению в динамическом режиме. При раздавливании отдельных монолитных



**Рис. 2. График деформирования целика льда до момента разрушения в условиях сжатия со срезом.**

Для нагружения использовался 50-тонный домкрат, установленный в выпиленной во льду нише, где находился целик льда. Достигнутая прочность на срез составила 0.89 МПа.

образцов, не содержащих трещин, пузырьков воздуха или других структурных особенностей, в условиях температур, начиная от  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , проявлялся эффект взрывного разрушения с разлетом осколков и дроблением до состояния «мучной пыли». Подобное свойство байкальского льда проявляется в природных условиях в виде эпизодов динамического разрушения ледяного покрова, которые мы назвали ледовыми ударами, по аналогии с горными ударами.

Вместе с этим заслуживает внимания еще одно свойство льда, выявленное при проведении испытаний на раздавливание цилиндрических ледяных образцов в полиэтиленовой оболочке, т.е. в стесненных условиях. Было установлено, что в этом случае образцы льда при  $T = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$  проявляли выраженные свойства вязкопластического течения. Образцы сохраняли целостность без разрушения при деформации не менее 47 %, при этом из-за условий стесненности была достигнута и повышенная сдвиговая прочность льда до наиболее высоких значений — 1.9 МПа, несмотря на то, что образцы имели структурные нарушения в виде включения пузырьков воздуха и трещин, понижающие прочностные показатели. В ходе экспериментов регистрировались акустические импульсы, порождаемые в процессе формирования многочисленных мелких трещин, возникающих при деформировании образцов. Обращает на себя внимание проявление в условиях стесненности механизма блокирования роста трещин из-за их сжатия и «залечивания» путем рекристаллизации, что предотвращало разрушение образцов при больших деформациях. В работе [Меллор, 1983] было отмечено уникальное свойство льда, а именно — сопротивление сдвигу у льда может снизиться до полного исчезновения при значительном росте гидростатического давления при обычных температурах. Там же была установлена зависимость возрастания прочности льда с увеличением скорости деформации. Отмеченные физические и механические особенности поведения льда в условиях стесненности заслуживают дальнейшего, более углубленного изучения, поскольку способны заметным образом влиять на реологическое поведение ледяного покрова при разных нагрузках, скоростях деформирования и температурах.

Как показали проведенные наблюдения и измерения, ледяной покров в вертикальном разрезе существенно образом изменяет физико-механические свойства при переходе от поверхности к основанию, где на контакте с водой температура льда близка к отметке  $+0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  [Дучков и др., 2007], а его физические свойства в основании разреза характеризуются как вязкопластические. Следовательно, структуру ледяного покрова можно в первом приближении рассматривать как двухслойную. Верхний слой льда имеет температуры, приближающиеся к температуре воздуха, и при  $T = -20\dots-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  лед в верхней части разреза проявляет свойства хрупкого материала. В целом байкальский ледяной покров обладает широким диапазоном механических свойств при различных условиях приложения нагрузки, а именно — упругость, нелинейную вязкость, разрушение в режимах ползучести и хрупкого поведения. Тем не менее до настоящего времени физические и механические свойства льда в целом, и в особенности ледяного покрова Байкала, остаются недостаточно изученными.

## **О ПРИЧИНАХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В БАЙКАЛЬСКОЙ ВПАДИНЕ**

При изучении динамических процессов, протекающих в ледяном покрове байкальской акватории, необходимо иметь представления о тех причинах, под влиянием которых происходит его деформирование и разрушение. Как показали исследования, пресноводный лед Байкала формируется в особых метеоро-геоструктурных условиях, а его физико-механические свойства нельзя назвать полностью аналогичными морским льдам [Помыткин, 1960; Сокольников, 1960, 1970; Байкал..., 1993; Жданов и др., 2001, 2002; Псахье и др., 2005а; Макштас и др., 2007].

Уникальность такого объекта, как ледяной покров Байкала, обусловлена огромной протяженностью байкальской акватории, равной 636 км при ширине водоема 25—79 км. Таким образом, общая площадь «ледовой лаборатории» Байкала составляет 31 500 км<sup>2</sup>. Ледяной покров озера подвергается влиянию погодных условий (температура, ветер, солнечная радиация и т. д.), формирующихся под воздействием циклонов, следующих с запада, а также под влиянием сибирского антициклона. Байкальский лед при его исключительной прозрачности и чистоте имеет также и существенные физико-механические отличия от морского льда [Физические свойства..., 1976; Распределение..., 1981], что выявилось уже в начальной стадии изучения.

Известно, что лед имеет способность значительного теплового расширения (коэффициент термического расширения при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет  $9.1 \times 10^{-5}$ ). Следовательно, при средней ширине байкальской акватории порядка 50 км одноактное суточное расширение ледяного покрова может достигать 45.5 м, а ночью, при понижении температур, испытывать сопоставимое сокращение. Таким образом, при резких температурных перепадах ледяной покров Байкала, ограниченный берегами, где лед во многих местах крепко спаян с донными осадками и кристаллическими породами, подвергается суточным ритмичным проявлениям сжатия и растяжения, что приводит к его деформированию и растрескиванию. Ночью при

сокращении поверхности ледяной покров раскрывает трещины, в которые проникает вода, в станových трещинах могут возникать разводья. Таким образом, из-за ритмичного многосуточного увеличения площади ледяного покрова происходит его торошение, которое особенно эффективно проявляется в термических швах или станových трещинах, являющихся границами крупных ледовых пластин. Эффективность проявления такого увеличения линейных размеров ледяного покрова будет наибольшей при значительных перепадах между ночным охлаждением и дневным повышением температуры воздуха и льда.

Колебания погодных условий в зимние и весенние месяцы (январе—апреле) обуславливают соответствующие тренды долговременных температурных изменений, что, в свою очередь, способствует процессам дивергенции и конвергенции ледяного покрова. В прибрежном районе пос. Листвянка установлено, что сезонная кумулятивная амплитуда деформаций сжатия по станovým трещинам разной генерации, рассчитанная исходя из высоты торосов и амплитуд поддвигания ледяных пластин (подсовов), достигает 6—10 м. Судя по распространению трещин, видимых на аэрофотоснимках, можно в первом приближении оценить суммарное расширение ледяного покрова за зимний сезон в поперечном направлении, равном порядка 50—100 м. Эта оценка находится в хорошем соответствии с данными [Сокольников, 1960], согласно которым максимальная величина поддвигания одной ледовой пластины под другую достигает 20 м, а таких подсовов может быть несколько. Понятно, что в продольном направлении байкальской акватории ледяной покров испытывает еще большее линейное расширение. Это подтверждают снимки в районе о. Ольхон и п-ова Святой Нос, где видны огромные поля торосов и дугообразные станové трещины, поперечные к длинной оси озера.

Наибольшая активность процессов динамического разрушения льда с ярко выраженными сейсмическими свойствами проявляется во второй—третьей декадах февраля и особенно в марте, что совпадает с периодом резких температурных перепадов. В этот период ледяной покров Байкала еще сохраняет максимальную монолитность, прочность и упругость. Он способен накапливать упругую энергию до максимальных значений — в солнечные дни при перепадах температур на 5—10 °С и более в сторону потепления, когда из-за теплового расширения начинает резко увеличиваться площадь ледяного покрова. Нельзя исключать также и влияния других вышеперечисленных факторов — таких, например, как конвективные подледные течения, увеличение «шероховатости» ледяного покрова сверху и снизу из-за процессов торошения, что способствует росту эффективности ветровых воздействий и возникающих деформаций льда. К концу марта и в начале апреля снег, предохраняющий от резких температурных перепадов, сдувается ветрами, испаряется и происходит резкое усиление динамики деформирования ледяного покрова. В местах отсутствия снежного покрова происходит прогрев воды солнечными лучами и возникают геострофические течения [Жданов и др., 2001, 2002].

Проведенные исследования [Сокольников, 1970; Ravens et al., 2000; Жданов и др., 2001, 2002] показали, что в подледный период течения сохраняются во всей водной толще. После ледостава происходит уменьшение скорости течений, они не превышают 10 см/с, так как лед экранирует ветровое воздействие. В подледный период сохраняется структура течений — общая циклоническая циркуляция и внутрикотловинные циркуляционные ячейки. В Лиственничном заливе в подледный период, как и в навигационный, существует антициклоническая циркуляционная ячейка. Причиной генерации антициклонической ячейки является сток в Ангару. На границе этой ячейки имеет место область конвергенции, которая располагается вблизи м. Лиственничный. Положение данной конвергентной зоны совпадает со становой щелью, обычно идущей от м. Березовый на пос. Танхой. Возможно, система подледных течений оказывает некоторое влияние на формирование станových щелей, однако более важная причина состоит в том, что мысы являются концентраторами напряжений, поскольку практически все поперечные по отношению к береговой линии станové щели начинаются у мысов.

Из справочных данных известно, что коэффициент ветрового трения о ледяной покров имеет значения 0.0012, а подледного трения льда с подводным течением — 0.0055 [Макштас и др., 2007]. В байкальских зимних условиях при штормовой погоде ветер может достигать скорости 20—30 м/с и более, тогда как скорости подледных течений ограничены значениями 10 см/с. Исходя из указанных сведений, нетрудно понять, что эффективное значение воздействия ветра на ледовую поверхность примерно на два порядка превосходит воздействие подледных течений. Из-за стока байкальских вод через Ангару изменение уровня воды в зимний период в сторону плавного понижения на десятки сантиметров происходит постепенно и сказывается наиболее заметным образом вблизи берегов в виде оседания ледяного покрова. Следует также учитывать роль метеобарических колебаний, которые способны вносить ощутимый вклад в вертикальные деформации ледовых полей, при этом сгонно-нагонные поперечные перекосы уровня могут достигать 10 см и более [Помыткин, 1960].

Роль эпизодических, иногда очень мощных воздействий на состояние ледяного покрова озера и его сейсмический фон могут играть и тектонические землетрясения, гипоцентры многих из которых располагаются в кристаллическом основании Байкальской рифтовой впадины, преимущественно на глубинах 5—20 км. Одним из таких событий является, например, Южно-Байкальское землетрясение (25.02.1999 г.,

$M = 6.0$ ), эпицентр которого располагался в 10 км южнее пос. Листвянка [Ружич и др., 2002]. Наиболее значительное сейсмогенное растрескивание ледяного покрова озера было отмечено на прибрежном участке в районе пос. Танхой, где при землетрясении во льду возникли щели до 1 м шириной, прослеживающиеся вдоль берега на расстояние во многие километры. Подробно описаны сильные ледовые подвижки и расколы ледяного покрова на льдины при историческом Цаганском землетрясении 11.01.1862 г., при котором интенсивность сейсмических колебаний достигала значений 10 баллов по шкале MSK-64.

### ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В ЛЕДОВЫХ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ТРЕЩИНАХ

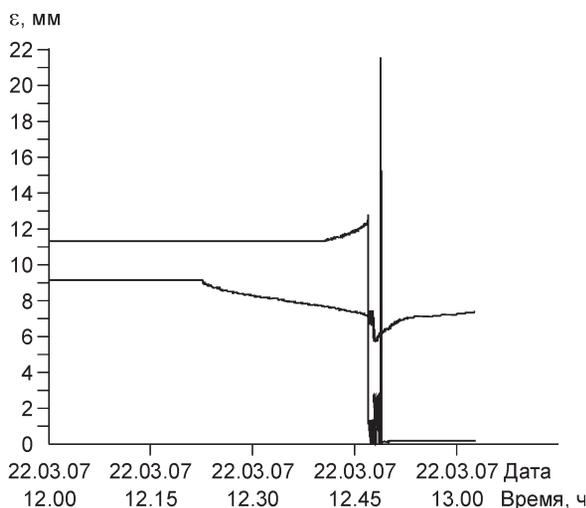
Деформирование и растрескивание ледяного покрова вследствие указанных выше причин так же, как и в массиве горных пород, сопровождается диссипацией энергии в виде волновых колебаний широкого спектра, включая интересующий нас сейсмоакустический диапазон. Для углубленного изучения режима деструкции ледяного покрова осуществлялись высокоточные инструментальные наблюдения за динамикой движений в трещинах различного иерархического уровня. Измерения проводились с применением специально разработанной аппаратуры «Сдвиг-3М» [Димаки и др., 2006]. Ниже представлены некоторые результаты таких измерений в крупных ледовых трещинах. При ночном охлаждении раскрытие трещин, которые на Байкале принято называть «щелевыми», достигало 10—20 см. При дневном прогреве льда и деформации сжатия по отдельной крупной трещине амплитуда смещений имела примерно те же или чуть меньшие значения. Таким образом, наибольшие скорости суточных перемещений берегов крупных становой трещин имеют значения 1—2 см/ч. Иной порядок скоростей наблюдается при динамических процессах растрескивания ледяного покрова, например, при тектонических землетрясениях или при ледовых ударах. Подобие ледовых ударов тектоническим землетрясениям достаточно очевидно уже при внешнем знакомстве с таким явлением, особенно, если его ощущать, находясь в непосредственной близости от становой трещины. Процесс быстрого вспарывания ледяного покрова на расстояния в десятки километров сопровождается шумовыми эффектами в виде шорохов, гула и сотрясений, очень похожих на проявление слабого землетрясения.

На рис. 3 видно расположение датчиков смещений (периферийного и центрального) в зоне Листвянской становой трещины в момент проявления ледового удара. Визуальные наблюдения у самой трещины в момент удара позволили зафиксировать амплитуду надвига ледовой пластины, достигавшую 1.5—2.0 м. Процесс надвигания происходил в течение 3—5 с, что дает представление и о его значительной скорости. Для сравнения заметим, что при сильных землетрясениях скорость смещений в зонах тектонических разломов достигает 5—10 м/с. Период между двумя очередными сильными ледовыми ударами в одном участке ледяного покрова составляет около 4—15 дней, и следовательно, за весь зимний период ледостава количество наиболее ощутимых ледовых ударов в одном районе не превосходит и десятка, а по всей площади озера количество подобных сейсмических эпизодов, фиксируемых береговыми сейсмостанциями, может исчисляться сотнями. На рис. 4 представлена запись смещений по Листвянской становой трещине в момент проявления ледового удара. Участниками экспедиции было визуально отме-



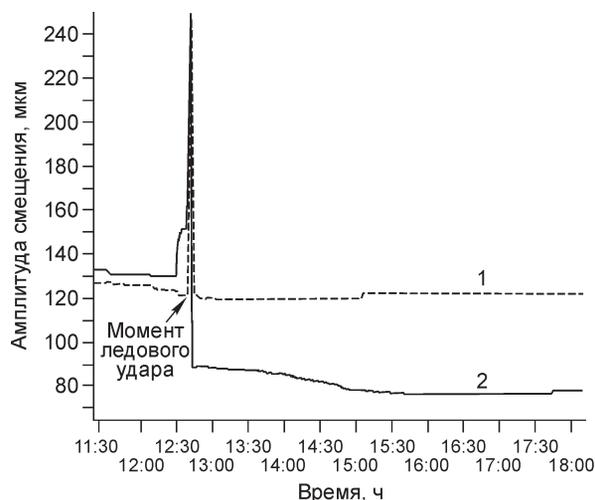
**Рис. 3.** Момент ледового удара и торошения льда 22 марта 2007 г. в 12 ч 44 мин по местному времени.

Видны датчики смещений, один из которых проваливается под лед из-за разрушения льдины.



**Рис. 4. Динамика смещений берегов трещин в становой Листвянской зоне при ледовом ударе 22.03.2007 г.**

Видно, что берега периферийной трещины начали движение раньше, чем в центральной части становой зоны. Амплитуда смещений в центральной трещине, по которой произошло основное вспарывание, была намного большей, чем в трещине периферийной.



**Рис. 5. График смещений по двум трещинам ледяного покрова северо-западного простира-ния в результате ледового удара 22.03.2007 г.**

Пояснения в тексте.

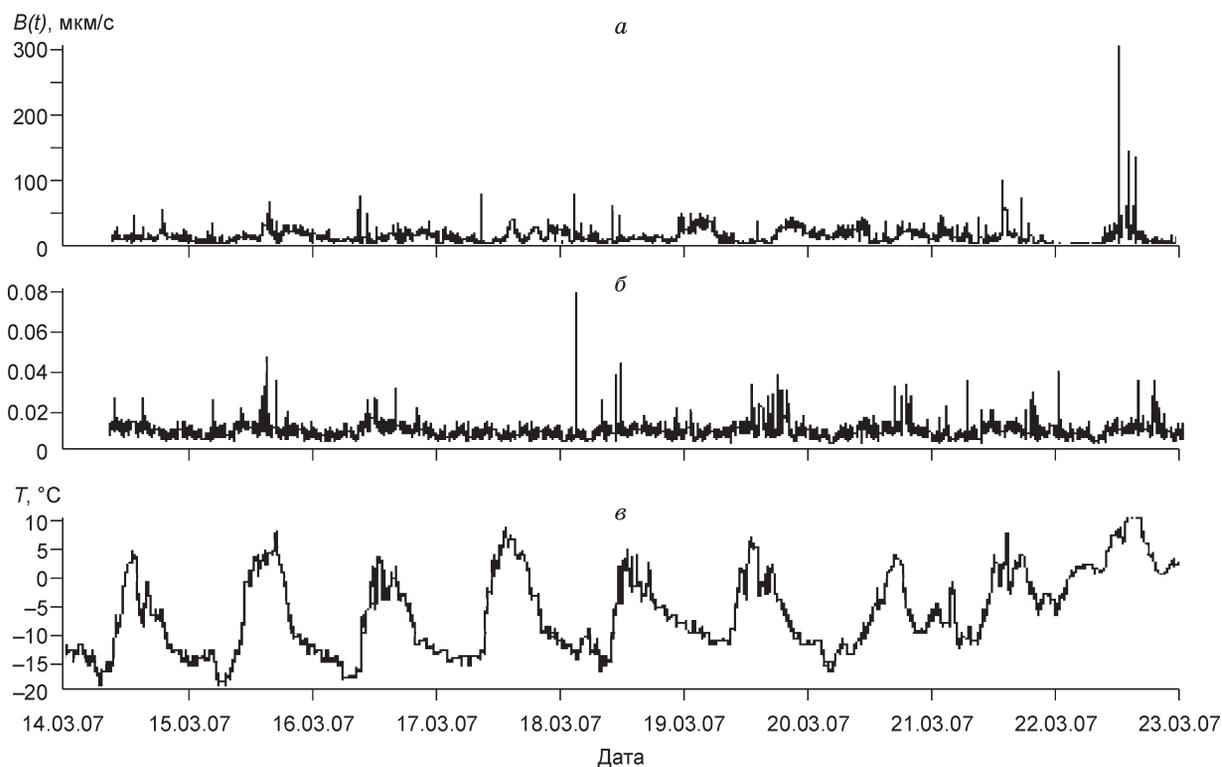
чено, что вспарывание становой трещины началось со стороны м. Лиственничный, этот факт подтверждает наше предположение о прибрежном расположении концентраторов разрушающих напряжений в ледовом покрове. На рис. 5 приводится запись смещений (в момент ледового удара) берегов двух других, более мелких трещин (1, 2), расположенных на удалении от становой трещины на 60 и 90 м. До момента проявления ледового удара в них происходило быстрое нарастание сжатия, а затем последовал импульс быстрого раскрытия, сменившийся возвратным смещением. Далее в течение нескольких часов происходило медленное возвратное смещение до исходного состояния раскрытия, которое было неполным для трещины 2. Физический смысл интерпретации наблюдаемых явлений можно свести к тому, что в ледяном покрове, насыщенном подобными трещинами на огромной площади, проявляется двухфазный отклик, а именно — быстрый (упругий) и замедленный (вязкопластический). Отметим, что такая реакция на внешнее динамическое воздействие отмечалась нами и в других подобных ситуациях в пределах ледяного покрова. Она также фиксировалась и в тектонических разрывных нарушениях земной коры после взрывного воздействия или землетрясения [Ружич и др., 1999; Псахье и др., 2005б].

Приведенные в кратком виде результаты проявления ледового удара дают возможность получить представление о важных деталях динамики вспарывания многокилометровых станowych трещин в режиме сжатия, что очень напоминает возникновение сейсмодислокаций при сильных землетрясениях.

### СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ БАЙКАЛА

Сведений о сейсмике ледяного покрова в Байкальской рифтовой впадине в настоящее время очень мало. Для регистрации сейсмических волн использовалась цифровая инженерно-сейсмометрическая станция Байкал-12 с сейсмодатчиками СК-1П и ОСП-2М. Измерительными каналами с сейсмоприемниками СК-1П регистрация велась в режиме виброскоростей, а сейсмоприемниками ОСП-2М — в режиме виброускорений. Датчики устанавливались в ледяной шурф и ориентировались по вертикали (Z) и по сторонам света (N—S, E—W).

**Фоновые суточные микроколебания льда.** В результате наблюдений за суточными вариациями фонового уровня микросейсмических колебаний льда, отражающих его растрескивание, установлено следующее. На рис. 6 представлены графики изменений уровня фоновых значений микросейсмических колебаний во льду и в скальном грунте в районе береговой сеймостанции Лиственничная в сопоставлении с изменениями температуры воздуха за период наблюдений с 14 по 23 марта 2007 г. По оси ординат отложены среднеквадратичные амплитуды скорости перемещений с осреднением по интервалу 2 мин. Средний уровень микроколебаний льда составляет около 10 мкм/с, грунта — 0.01 мкм/с. Наблюдаются



**Рис. 6. Вариации уровня микросейсмических колебаний ( $B(t)$ ) в ледяном покрове (*a*) и в скальном грунте (*б*) как отклик на суточные изменения температуры воздуха (*в*).**

суточные вариации уровня микроколебаний льда с амплитудой 5—10 мкм/с и грунта — 0.025—0.04 мкм/с. Коэффициент корреляции между колебаниями температуры льда и его микроколебаниями достигает максимального значения 0.78 при сдвиге ~4 ч из-за более медленного прогрева ледяного покрова.

Видно, что вариации фонового уровня микросейсмических колебаний имели относительно регулярный характер: максимум чаще всего проявлялся в окологлоуполуночное время, а минимальные его значения, как правило, фиксировались в дневное время в интервале 10—12 ч. Однако наиболее мощные микроимпульсы, порядка 50—100 мкм/с, происходили в окологлоуполуденное время, так же, как и большинство ледовых ударов. Заметим, что температурный режим ледяного покрова реагирует на изменения температуры воздуха с запаздыванием на 3—4 ч из-за его более медленного прогрева. Соответственно смещаются во времени температурные эффекты растрескивания ледяного покрова в ночное время и днем по отношению к максимумам и минимумам температурных изменений воздуха. По данным береговой сейсмостанции выяснено, что в пос. Листвянка максимум фоновой сейсмичности связан с тепловым расширением горных пород в дневное время, а минимум приходится на период ночного похолодания. Анализ полученных сейсмологических данных, касающихся фоновых изменений, позволяет сделать следующее заключение. Ночное понижение температуры воздуха с учетом тепловой инерции ледяного покрова приводит к сокращению его площади и, соответственно, к растрескиванию в виде появления многочисленных мелких трещин, а также росту уже существующих. Рост микротрещиноватости сопровождается умеренным возрастанием уровня фоновой микросейсмичности ледяного покрова. Иная картина наблюдается в дневное время — при повышении температуры воздуха и прогреве льда солнечными лучами. В утренние часы вместо многочисленных слабых импульсов появляются редкие, но энергетически более мощные. Это означает проявление растрескивания ледяного покрова в условиях сжатия из-за постепенного прогрева и теплового расширения. В такой ситуации ранее возникшие трещины растяжения во льду сжимаются и смерзаются, но зато в условиях сжатия начинают активизироваться трещины скалывания, нарастает развитие становых трещин в виде взбросов и надвигов, а также поддвигов (подсовов). На фоне повышения температуры воздуха и прогрева льда в окологлоуполуденное время (12—16 ч) проявляются в максимальной степени процессы компрессивной деструкции ледяного покрова, которые эпизодически сопровождаются мощными ледовыми ударами и всплесками сейсмической активности, намного превышающей ночной сейсмический процесс депрессивного растрескивания льда. Дневное понижение фонового уровня микросейсмических колебаний, по-видимому, можно объяснить как следствие перехода растрескивания

**Результаты измерения скоростей и ускорений в ледовом покрове  
при тестовых микровзрывах 21 марта 2007 г.**

№ взрыва	Время, ч	Q, г	R, м	Кинематический параметр	N—S	E—W	Z	Абсолютная величина
1	14—15	45	115	Смещение, мм	0.2	0.4	0.16	0.5
				Скорость, мм/с	1.3	8.3	3.1	9.0
				Ускорение, мм/с <sup>2</sup>	114	587	289	664.1
2	14—25	105	155	Смещение, мм	0.2	0.6	0.45	0.8
				Скорость, мм/с	1.9	5.6	3.7	7.0
				Ускорение, мм/с <sup>2</sup>	136	432	349	571.8
3	17—45	45	140	Смещение, мм	0.29	0.32	0.26	0.5
				Скорость, мм/с	2.1	3.6	5.3	6.7
				Ускорение, мм/с <sup>2</sup>	239	191	386	492.5

в другой режим деструкции — компрессионный, который проявляется иным образом, особенно заметным на стадии подготовки ледовых ударов и после них.

Обращает на себя внимание то, что подготовка ледового удара происходила на фоне явного потепления, начавшегося в ночь на 21 марта 2007 г. На приведенном графике (см. рис. 6, а) также можно заметить, что перед ударом имела место фаза сейсмического затишья длительностью около 9 ч. Полученные сведения указывают на то, что температурные изменения являются основной причиной деформирования и растрескивания байкальского льда. Наблюдаемые сейсмические явления при его деформировании обнаруживают сходство с подготовкой землетрясений или горных ударов.

**Оценка энергии ледового удара.** Для оценки энергии ледового удара были использованы сейсмические записи, позволяющие оценить значения затухания колебаний при трех подледных микровзрывах. На основании применения линейной теории поглощения сейсмических волн оценивалось изменение максимальной массовой скорости с расстоянием. Расчеты и большой объем экспериментальных данных показывают, что на расстояниях до 8—10 радиусов излучателя  $R_0$  закон изменения максимальной массовой скорости с расстоянием можно представить в виде

$$U = U_0 \left( \frac{R}{R_0} \right)^{-n},$$

где  $n = 1.4—1.8$ .

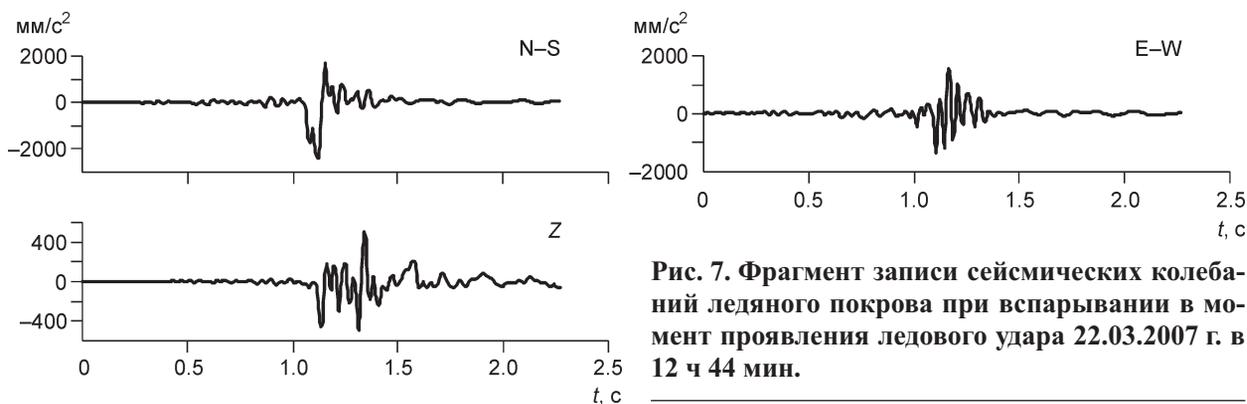
Эта зависимость широко используется для описания наблюдаемых в эксперименте изменений амплитудных и временных характеристик сейсмических колебаний с расстоянием. Максимальная амплитуда скорости перемещений зафиксирована на вертикальной составляющей в положительной фазе колебаний и равняется 5.3 мм/с. В таблице приведены данные по серии микровзрывов. Измерялись максимальные амплитуды по измерительным каналам с датчиками ОСП-2М. Для расшифровки сейсмических записей, полученных при ледовых деформациях, и их сопоставления с таковыми для породного массива или земной коры, в ледяном покрове проводились тестовые микровзрывы с зарядами массой  $Q = 45—105$  г ВВ, помещенными в металлический патрон.

Для анализа наблюдаемых в эксперименте изменений амплитудных характеристик сейсмических колебаний с расстоянием обычно используется показатель скорости смещения. Максимальная скорость смещения льда с расстоянием связана следующей зависимостью [Садовский, 1999]:

$$U = 5382 \left( \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-1.5},$$

где  $U$  — скорость смещения в см/с,  $R$  — расстояние в м,  $Q$  — вес ВВ в кг.

При анализе записи ледового удара удалось выяснить, что максимальная амплитуда наблюдалась по компоненте N—S в отрицательной фазе 2340 мм/с<sup>2</sup>. Максимальная амплитуда скорости перемещений льда при этом разрыве составила 87.5 мм/с, смещения — 4.6 мм. Сделанная по этим данным формальная оценка интенсивности сейсмических сотрясений в районе вспарывания ледовой трещины дает значение, равное 4—5 баллам по инструментальной части шкалы MSK-64. Согласно расстановке сейсмодатчиков по отношению к становой трещине, наименьшее удаление от нее составляло около 40 м. Если в расчетах исходить из такой оценки удаления источника сейсмических колебаний от датчиков, тогда величина энергии ледового удара, вычисленная через эквивалент спадания с расстоянием известной энергии заряда ВВ, составит  $10^4—10^5$  Дж или 0.3—0.8 в значениях магнитуд [Аптикаев, 1969]. Полученная энерги-



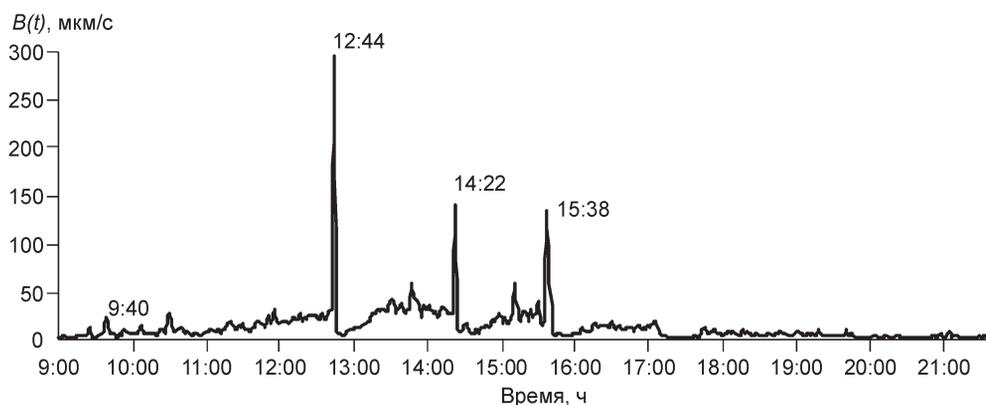
**Рис. 7. Фрагмент записи сейсмических колебаний ледяного покрова при вспарывании в момент проявления ледового удара 22.03.2007 г. в 12 ч 44 мин.**

ческая оценка ледового удара на Байкале сделана впервые и может рассматриваться лишь как приближение, поскольку, согласно принятой схеме расчета, она во многом зависит от правильности измерения пути спадания. Если это расстояние взять большим, т.е. порядка 500 м, то энергия составит  $10^7$  Дж. Из проведенных расчетов становится очевидным, что энергетические параметры ледовых ударов сопоставимы со слабыми тектоническими землетрясениями или горными ударами средней силы. Их энергия может зависеть от толщины ледяного покрова, его реологического состояния, а также размеров и устройства становой трещины сжатия.

**Ледовый удар как модель землетрясения.** На основе анализа сейсмических записей были предприняты попытки оценить скорость сейсмогенного вспарывания ледяного покрова Байкала в моменты проявления ледовых ударов, сопровождающегося разрывом сплошности на протяжении многих километров. Полученные с помощью регистрации длительности записи момента вступления сейсмических колебаний при ледовом ударе разнесенными друг от друга сейсмическими датчиками позволили установить следующие значения. Скорость распространения подвижки по трассе Листвянской становой трещины в направлении от берега может достигать значений 0.1—0.2 км/с. Для сравнения заметим, что при сильных землетрясениях тектонического происхождения скорость сейсмогенного вспарывания в земной коре около 1—3 км/с. 22 марта 2007 г. в 12 ч 44 мин с помощью цифровой сейсмической станции Байкал-12, расположенной на удалении 40 м от активизированной становой трещины, был зарегистрирован ледовый удар. Впервые для байкальского ледяного покрова это событие удалось зафиксировать сейсмологическими средствами при близком расположении датчиков к вспоровшейся становой трещине. Данное обстоятельство позволило провести некоторые важные расчеты по оценкам интенсивности сейсмических сотрясений стандартными методами инженерной сейсмологии. На рис. 7 приведены сейсмические записи процесса разрыва льда тремя измерительными каналами с датчиками ОСП-2М в режиме ускорений.

При структурном изучении установлено, что прослеженная на десятки километров зона Листвянской становой трещины состоит из крупных правосторонних кулис. Из этого следует, что на окончаниях кулис скорость вспарывания по зоне снижается до значений, приближающихся к нулевым, а максимальных значений вспарывание достигает, по-видимому, в средней части кулисы. Поэтому динамическое вспарывание зоны становых трещин при ледовых ударах происходит фрагментарно и прерывисто, т.е. в растянутом временном интервале. При обследовании после удара ледяной перемычки между кулисами шириной 50—60 м, были отмечены признаки ее интенсивного растрескивания при ледовом ударе. Появились протяженные трещины «щелевого» типа шириной до 0.3—0.4 м, имеющие субмеридиональное и субширотное простирания. В результате перемычка между кулисами становой трещины была разбита на фрагменты. Примечательно, что следующая кулиса оказалась активизированной в намного меньшей степени, если судить по амплитудам смещений. Данные визуальные наблюдения дают ценную информацию о кинематике вспарывания становой трещины в байкальском ледяном покрове, которую можно рассматривать как модель вспарывания зоны тектонического разлома при землетрясении.

На рис. 8 показан еще один фрагмент записи изменений сейсмического фона при ледовом ударе 22.03.2007 г. в районе экспедиционного пункта наблюдений. Из рисунка видно, например, что период подготовки кульминации динамического разрушения ледяного покрова в виде нарастания сейсмического фонового уровня начался примерно за 3 ч до момента первого удара — в 12 ч 44 мин. После него произошли еще два аналогичных события, но уже на других, более удаленных фрагментах зоны становой трещины, с интервалами 1 ч 36 мин и 1 ч 16 мин, которые можно рассматривать как афтершоки или как самостоятельные сейсмические акты в одной протяженной становой трещине. После этих трех эпизодов активизации в становой зоне сейсмический фон к 18 ч постепенно снизился до минимального уровня. В целом весь период сейсмической активизации по становой трещине занял около 8—9 ч. При вспарывании зоны наблюдался характерный для сейсмогенных разломов парагенезис из трещин сжатия надвиго-



**Рис. 8. Фрагмент записи изменений фонового уровня сейсмических импульсов и моментов трех сейсмических ударов, зарегистрированных 22.03.2007 г.**

Цифрами указано время событий.

вого типа и растяжения, что характерно для тектонических сейсмодислокаций взбросодвигового типа. Описанные явления сейсмогенного вспарывания ледяного покрова во многом напоминают динамику возникновения зон сейсмодислокаций и их строение при сильных и катастрофических землетрясениях [Ружич, 2007; Psakhie et al., 2007].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сведения, полученные с помощью проведенных деформометрических и сейсмоакустических наблюдений, подтверждают вывод о том, что ледяной покров Байкала деформируется под воздействиями нескольких основных факторов, перечисляемых в порядке их примерной значимости: температурных изменений, ветров, подледных течений, перепадов атмосферного давления. Такая комбинация во многом напоминает медленные деформирующие воздействия на земную кору, что позволяет добиваться хорошего подобия при тектонофизическом моделировании сеймотектонических процессов на ледяном покрове.

Механизм подготовки и осуществления ледового удара имеет много сходства с подготовкой очагов землетрясений и их реализацией с образованием сейсмогенных разрывов. Сейсмические процессы, фиксируемые при деформировании ледяных полей и их разрушении, по энергетическому уровню достигали значений  $10^4$ — $10^5$  Дж ( $M = 0.3$ — $0.8$ ), интенсивности 3—4 баллов по шкале MSK-64, т.е. по эффектам проявлений соответствуют уровню слабых землетрясений тектонического происхождения или горных ударов средней силы. Наблюдаемый режим деформирования и генерации упругих импульсов при возникновении и росте ледовых трещин во многом идентичен сеймотектоническому режиму в зонах разломов или при подготовке горных ударов.

Обнаруженное проведенными измерениями сходство открывает благоприятные перспективы в области моделирования тектонических и сеймотектонических процессов в уникальном ледяном покрове Байкала. Оно будет весьма полезным для расширения и углубления современных представлений о сеймотектонических процессах, механизмах подготовки очагов землетрясений, горных ударов и совершенствования методов их прогноза.

Авторы выражают признательность и благодарность академику РАН Н.Л. Добрецову за поддержку исследований байкальского льда.

Работы выполнялись в рамках интеграционных проектов СО РАН № 26, 27 и МДП СО РАН № 6.18.

### ЛИТЕРАТУРА

- Аптикаев Ф.Ф.** Сейсмические колебания при взрывах и землетрясениях. М., Наука, 1969, 104 с.
- Байкал.** Атлас. М., РАН СО, Межвед. научн. совет, Федер. служба. геодезии и картографии. 1993, 160 с.
- Гаккель Я.Я.** Природное «моделирование» на ледяной коре. Т. 90. М., Изд-во ВГО, 1959, с. 21—32.
- Димаки А.В., Астафуров С.В., Шилько Е.В., Ружич В.В., Псахье С.Г.** Аппаратно-программный комплекс регистрации смещений в зонах разломов «Сдвиг-3М» // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли (Тр. Международной конференции). Новосибирск, Институт горного дела СО РАН, 2006, с. 193—199.

**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 // Докл. РАН, 2007, т. 412, № 5, с. 656—660.

**Дучков А.Д., Истомин В.Е., Казанцев С.А.** Температурный режим льда озера Байкал и связанные с ним внутренние напряжения в ледяной плите // Физическая мезомеханика, 2007, № 10, с. 87—92.

**Жданов А.А., Гранин Н.Г., Шимараев М.Н.** О механизме генерации подледных течений в Байкале // Докл. РАН, 2001, т. 377, № 3, с. 392—395.

**Жданов А.А., Гранин Н.Г., Шимараев М.Н.** Подледные течения Байкала (на основе новых экспериментальных данных) // География и природные ресурсы, 2002, № 1, с. 79—83.

**Макштас А.П., Марченко А.В., Шутилин С.В.** Расчет торошения в моделях динамики морского ледяного покрова // Современные проблемы исследования быстропротекающих процессов и явлений катастрофического характера. М., Наука, 2007, с. 134—150.

**Меллор М.** Механические свойства поликристаллического льда // Физика и механика льда. М., Мир, 1983, с. 203—239.

**Помыткин Б.А.** К вопросу о сгонно-нагонных колебаниях уровня озера Байкал // Тр. Байкальской лимнологической станции. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1960, с. 242—263.

**Псахье С.Г., Ружич В.В., Гранин Н.Г., Ченский А.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Димаки А.В., Астафуров С.В.** Изучение закономерностей развития сейсмотектонических процессов в земной коре на модельной системе ледового покрова озера Байкал // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Вып. 3. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2005а, с. 225—229.

**Псахье С.Г., Ружич В.В., Шилько Е.В., Попов В.Л., Димаки А.В., Астафуров С.В., Лопатин В.В.** О влиянии состояния границ раздела на характер локальных смещений в разломно-блоковых и интерфейсных средах // Письма в ЖТФ, 2005б, т. 31, вып. 16, с. 80—87.

**Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород.** Справочное пособие. М., Недра, 1981, 192 с.

**Ружич В.В.** Применение экспериментальных методов в сейсмогеологии // Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. Материалы Всерос. совещ. Т. 2. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2007, с. 118—124.

**Ружич В.В., Трусков В.А., Черных Е.Н., Смекалин О.П.** Современные движения в зонах разломов Прибайкалья и механизмы их инициирования // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (3), с. 360—372.

**Ружич В.В., Семенов Р.М., Мельникова В.И., Смекалин О.П., Алакшин А.М., Чипизубов А.В., Аржанников С.Г., Емельянова И.А., Демьянович М.Г., Радзиминович Н.А.** Геодинамическая обстановка в районе Южно-Байкальского землетрясения 25.02.1999 года и его характеристика // Геология и геофизика, 2002, т. 43(5), с. 470—483.

**Садовский М.А.** Геофизика и физика взрыва. Избранные труды. М., Наука, 1999, 335 с.

**Сокольников В.М.** Вертикальные и горизонтальные смещения и деформации сплошного ледяного покрова Байкала // Тр. Байкальской лимнологической станции. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1960, с. 291—350.

**Сокольников В.М.** Течения в глубинных слоях и водообмен в Байкале // Особенности отдачи байкальского тепла и влаги перед ледоставом // Течения и диффузия вод Байкала. Л., Наука, 1970, с. 67—74.

**Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика).** Справочник геофизика. М., Недра, 1976, 423 с.

**Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V., Popov V.L., Astafurov S.V.** A new way to manage displacements in zones of active faults // Tribol. Intern., 2007, v. 40, № 6, p. 995—1003.

**Ravens T.M., Kocsis O., Wuest A., Granin N.G.** Small-scale turbulence and vertical mixing in Lake Baikal // Limnol. Oceanog., 2000, 45, № 1, p. 159—173.