



УДК 550.343.3

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.38.13>

## Методология деформационного мониторинга в Южном Прибайкалье и концептуальный подход к прогнозу землетрясений

С. А. Борняков, Д. В. Салко

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Г. В. Встовский

*Научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций  
им. Н. М. Мельникова, г. Москва, Россия*

**Аннотация.** Рассмотрен подход к созданию способа прогноза сильных землетрясений на основе данных мониторинга деформаций горных пород. Описаны его концептуальная основа, техническая база проводимого в Южном Прибайкалье деформационного мониторинга и методы обработки получаемого фактического материала. На примере произошедших в последнее время в Южном Прибайкалье трех сильных землетрясений – Култукского (27.08.2008), Быстринского (21.09.2020) и Кударинского (10.12.2020) – показаны предшествующие им особенности развития деформаций горных пород, а также влияние на них структурно-геодинамических условий в местах расположения пунктов мониторинга и пространственного положения этих пунктов относительно готовящегося очага землетрясения.

**Ключевые слова:** землетрясение, прогноз, деформации горных пород, мониторинг.

**Для цитирования:** Борняков С. А., Салко Д. В., Встовский Г. В. Методология деформационного мониторинга в Южном Прибайкалье и концептуальный подход к прогнозу землетрясений // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 38. С. 13–40. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.38.13>

### Введение

Южное Прибайкалье (ЮП) находится в пределах активно развивающейся Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), характеризующейся значительным сейсмическим потенциалом, и периодически испытывает весьма ощутимые динамические воздействия от происходящих в его пределах сильных землетрясений с магнитудой более 7 и с интенсивностью сотрясений в эпицентрах до 10 баллов. Высокая степень урбанизации ЮП и активное развитие в его пределах промышленных кластеров и транспортных систем существенно повышает актуальность проблемы прогноза сильных землетрясений. Поиск решений этой проблемы ведется по разным направлениям, и одно из них связано с инструментальным мониторингом деформаций горных пород на малых базах.

Первые измерения деформаций горных пород в ЮП, ориентированные на поиск предвестников землетрясений, начаты в 1987 г. лазерным деформографом, установленным ИЛФ СО РАН в штольне на территории сейсмостан-

ции «Талая», и проводились до 2015 г. На основе результатов многолетнего мониторинга было показано, что горизонтальные деформации связаны с субширотными перемещениями блоков земной коры со скоростями от 1 до 10 мм/год. Были выделены долговременные вариации деформаций в земной коре ЮП, обусловленные их накоплением и релаксацией при сильных землетрясениях, а также впервые в деформационном процессе обнаружено явление возбуждения колебаний в диапазоне периодов 0,3–10 с [Исследование наклонов ... , 1994; Тимофеев, 2004; Результаты деформографических ... , 2019].

В 90-х гг. был организован пункт мониторинга смещений по зоне локального разлома в обнажении на территории обсерватории ИСЗФ СО РАН в пос. Листвянка. Эти экспериментальные исследования были направлены на разработку технологии управления режимом смещений в зонах активных разломов. На основе результатов многочисленных экспериментов было показано, что высокие напряжения на таких разломах могут быть безопасно сняты путем дозированного техногенного инициирования последовательности небольших сейсмогенных подвижек по ним [Режимы отклика ... , 2001; Изучение влияния ... , 2004; Влияние виброимпульсных ... , 2007; Об управлении режимами ... , 2020].

В 2008 г. в упомянутой выше штольне проводился мониторинг деформаций горных пород в одной точке регистратором «Сдвиг» [Ружич, 2004]. На основе полученных данных был предложен новый подход к средне- и краткосрочному прогнозу землетрясений [Борняков, Встовский, 2010].

С 2012 г. в ЮП развивается сеть пунктов мониторинга деформаций горных пород на малых базах на новой технической основе [Салко, Борняков, 2014] с целью выявления особенностей реализации деформационного процесса в преддверии сильных землетрясений, которые могут быть положены в основу разработки способа их прогноза. За истекшее время была проведена модернизация пункта «Талая» и созданы новых три пункта в пределах С-3 побережья Байкала.

В настоящей статье на основе полученного фактического материала с учетом имевших место в период инструментальных измерений трех сильных землетрясений – Култукского (27.08.2008), Быстринского (21.09.2020) и Кударинского (10.12.2020) – показана перспективность использования данных деформационного мониторинга для прогнозных построений. В ней освещены методические вопросы мониторинга, включая его концептуальную основу, техническое обеспечение, методы обработки получаемого фактического материала. На примере особенностей реализации деформационных процессов перед землетрясениями показаны прямые и косвенные признаки их подготовки, которые могут в дальнейшем рассматриваться как предвестники.

### **Концептуальный подход к созданию способа краткосрочного прогноза землетрясений на основе данных мониторинга деформаций горных пород**

Создание способа прогноза тектонического землетрясения, как и любого другого малоизученного природного явления, должно опираться на адекватно описывающую его теоретическую модель, из которой вытекают устойчиво проявляющиеся прогнозные признаки. Существует несколько

моделей очага тектонического землетрясения, из которых доминирующими являются модель неустойчивого трещинообразования [Мячкин, 1978] и модель прерывистого скольжения (stick-slip model) [Brace, Byerlee, 1966]. В основе первой из них лежит процесс зарождения, роста и последующего быстрого объединения многочисленных небольших разрывных нарушений в один протяженный разлом, сопровождающегося сейсмогенным смещением по нему. Вторая модель, в отличие от первой, описывает процесс периодической сейсмогенной активизации уже существующего разлома.

Считается, что в уже существующей системе крупных активных разломов континентальной литосферы последний механизм реализуется чаще, чем первый, и ему уделяется больше внимания в исследованиях, связанных с прогнозом землетрясений. За вторую половину прошлого века были выполнены многочисленные экспериментальные воспроизведения модели stick-slip в лабораторных условиях для оценки повторяемости сейсмогенных смещений на разломах и регистрации предшествующих им физических явлений, рассматриваемых как возможные предвестники землетрясений. Полученные экспериментальные результаты в совокупности с результатами теоретических исследований и натуральных наблюдений существенно расширили представления о физике очага землетрясения и позволили выделить широкий набор его краткосрочных предвестников [Cicerone, Ebel, Britton, 2009]. При этом в качестве предвестников принималось аномальное поведение тестируемых параметров перед землетрясением. Проводимые на старой концептуальной основе, эти исследования не привели к решению проблемы прогноза и даже породили сомнения в возможности его реализации [Earthquake cannot ... , 1997]. Определенному прогрессу в этом направлении способствовало использование концептуальной идеи синергетики [Хакен, 1980; Пригожин, Кондепуди, 2002]. С ее позиции сейсмоактивный разлом может рассматриваться как открытая неравновесная динамическая система, а порождаемое им землетрясение как самоорганизованная критичность (СОК) [Bak, Tang, 1987] с кооперативным поведением деформационного процесса непосредственно перед землетрясением [Feder, Feder, 1991; Ciliberto, Laroche, 1994; Olami, Feder, Christensen, 1992].

Модель СОК получила подтверждение в экспериментах на прецизионном сервоуправляемом прессе по моделированию сейсмической активизации разломов по механизму stick-slip [Ma, Sherman, Guo, 2012; Ma, Guo, Sherman, 2014]. В цитируемых работах показано, что в нагруженной системе из двух контактирующих по разрыву блоков деформационный процесс, предшествующий реализации импульсной подвижки, развивается стадийно.

Эта стадийность проявляется в изменении средней сдвиговой нагрузки во времени (рис. 1). График показывает вариации нагрузки на штампе прессы и характеризует деформационную динамику всей границы между взаимодействующими блоками перед реализацией сдвиговой импульсной подвижки на временном интервале от 660 до 700 с. На врезке графика этот момент показан серым квадратом (см. рис. 1, врезка). На отрезке NO фиксируется отклонение графика от линейности. В точке O достигается максимальное значение нагрузки на штампе прессы и система переходит в мета-

стабильное состояние. На отрезке  $AB_2$  реализуется метанестабильное состояние, подразделяющееся на подстадии ранней (отрезок  $AB_1$ ) и поздней (отрезок  $AB_2$ ) метанестабильности. За точкой  $B_2$  развивается динамическая неустойчивость в виде импульсной подвижки. В первую метанестабильную стадию стартует и развивается в квазикриповом стационарном режиме процесс относительного смещения блоков с медленной релаксацией накопленных на межблоковом контакте напряжений, что обусловлено зарождением на нем небольших микроочагов разрушения в виде небольших активизированных сегментов. В подстадию ранней метанестабильности продолжается медленный спад напряжений за счет постепенного увеличения изолированных сегментов в плоскости разрыва. В подстадию поздней метанестабильности, именуемую также подстадией ускоренного синергизма, реализация деформаций нарастает и ускоряется. Синергизм проявляется непосредственно перед трансформацией квазистатического состояния в динамическое благодаря кооперативному поведению всех активизированных сегментов, т. е. их самоорганизации. Именно по ее наличию может диагностироваться метанестабильная стадия активизации разлома в природной ситуации.

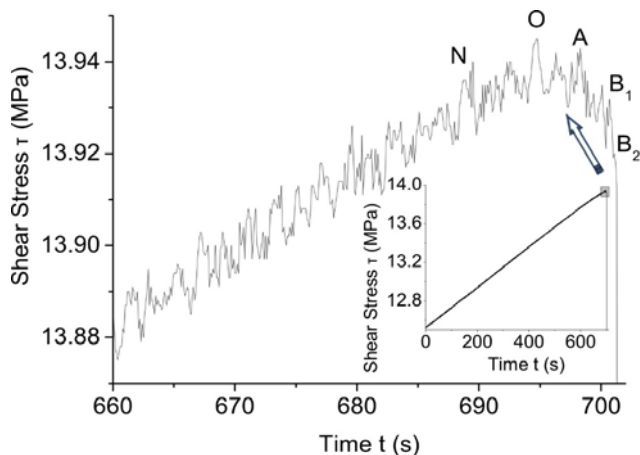


Рис. 1. График изменения сдвигового напряжения во времени перед импульсной подвижкой (малый график справа) и его увеличенный фрагмент в критической точке, показанный маленьким серым квадратом (по [Ma, Guo, Sherman, 2014])

Таким образом, из усовершенствованной модели stick-slip в ее синергетической интерпретации [Ma, Sherman, Guo, 2012; Ma, Guo, Sherman, 2014] следует, что в качестве предвестника землетрясения следует использовать не аномальные вариации того или иного геофизического параметра, а критическое динамическое состояние разлома, достигаемое в позднюю подстадию метанестабильной стадии. Прямым и неизбежным индикатором этого состояния является процесс самоорганизации активизированных сегментов в плоскости сместителя разлома непосредственно перед его сейсмогенным вспарыванием. Процесс самоорганизации может быть диагностирован по анализу временных рядов данных деформаций горных пород некоторыми математическими методами. Авторами апробированы метод анализа кривизн струк-

турных функций (МАКСФ) [Vstovsky, 2006; Борняков, Встовский, 2010], методы спектрального [Savransky, 2004; Scargle, 1982, 1989; Diagnostics of meta-instable ... , 2017], энтропийного [Бриллюэн, 1966; Зубарев, Морозов, Рёпке, 2002] и фрактального [Mandelbrot, 1982; Fractal analysis ... , 1990] анализа.

### Техника измерений деформаций горных пород на малых базах

Измерения деформаций горных пород проводится инструментальным комплексом (ИК) авторской разработки [Салко, Борняков, 2014]. ИК включает в себя прибор сбора и передачи данных (ПСПД), аналого-цифровые преобразователи (АЦП), аналоговые датчики, систему автономного питания, базовый сервер, а также серверную и клиентскую программы управления (рис. 2). Основное назначение ИК – измерять и точно привязывать во времени показания с датчиков разного типа, записывать их во флеш-память с последующей передачей в режиме онлайн по системе сотовой связи на удаленный базовый сервер.

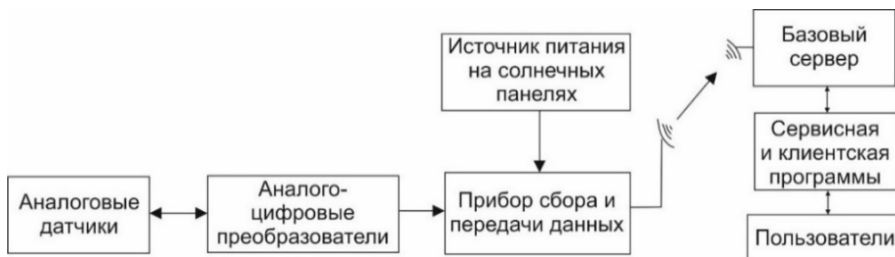


Рис. 2. Блок-схема инструментального комплекса для мониторинга геофизических параметров

В ПСПД использована шина RS485, позволяющая одновременно подключить до 32 АЦП. Количество используемых датчиков определяется количеством каналов АЦП. При одно- и двухканальном исполнении к ним может быть подключено 32 или 64 датчика соответственно. В качестве измерительного элемента используются тензодатчики балочного типа, тарированные на линейные деформации. АЦП опрашивают датчики с дискретностью 8 Гц в течение 10 с, из накопленных 80 значений берут среднее и отправляют эту среднюю цифру на ПСПД с последующей передачей в базу данных на сервер. Таким образом, дискретность данных формируемого временного ряда составляет 10 с.

### Общая характеристика устройства пунктов мониторинга

В пункте «Талая» мониторинг деформаций горных пород проводится пространственной сетью из десяти штанговых датчиков, расположенной в старой штольне (рис. 3, 4). Штанговый датчик состоит из измерительного элемента, тензодатчика и штанги из металлического квадратного профиля длиной 6 м, поддерживаемой подвижными упорами, исключаяющими ее боковые и вертикальные перемещения. Один конец штанги закреплен с бетонной тумбой, имеющей жесткое сцепление со скальным основанием, другой ее конец соединен с тензодатчиком, расположенным на такой же цементной тумбе.

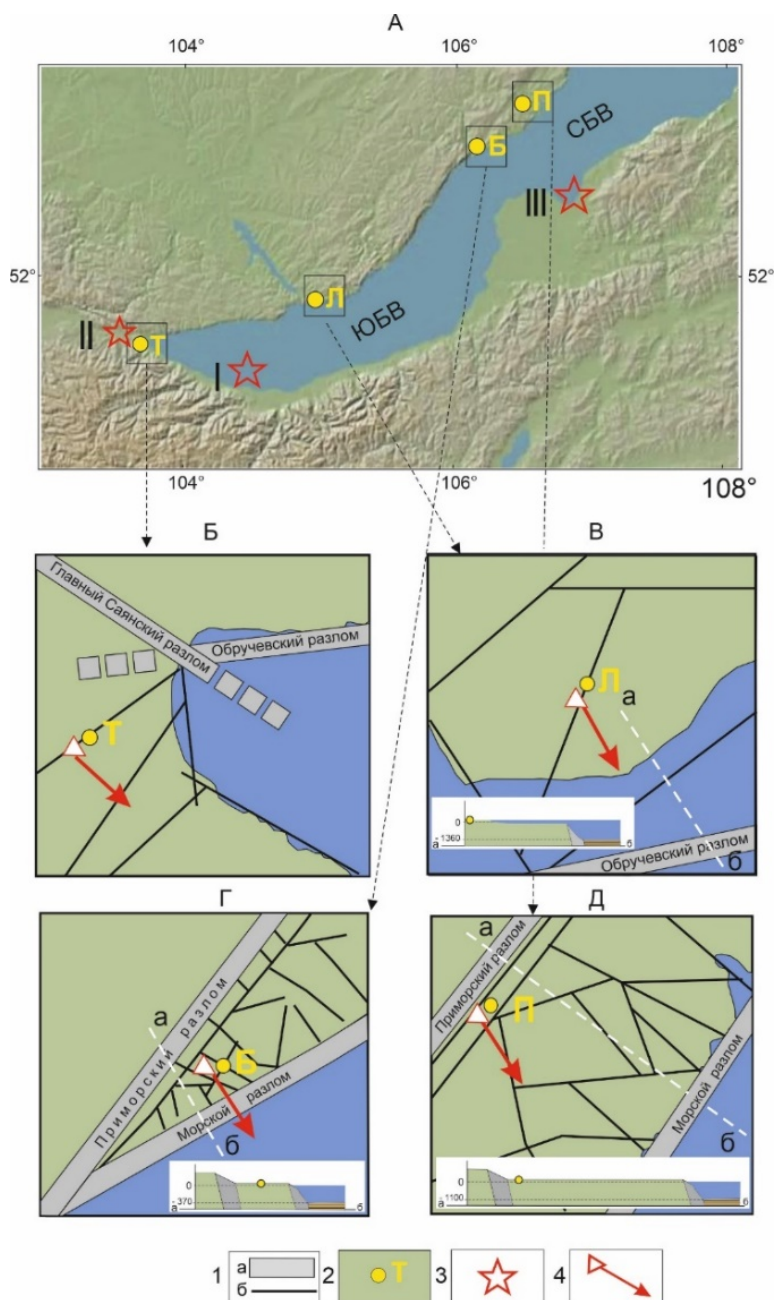


Рис. 3. Места расположения (А), структурные и геодинамические условия (Б, В, Г, Д) в окрестности пунктов деформационного мониторинга в Южном Прибайкалье. ЮБВ – Южно-Байкальская и СБВ – Средне-Байкальская впадины.

1 – крупные структурообразующие (а) и второстепенные, локальные (б) разломы; 2 – пункты мониторинга: Т – Талая, Л – Листвянка, Б – Бугульдейка П – Приольхонье; 3 – эпицентры Култукского (I) Быстринского (II) и Кударинского (III) землетрясений; 4 – пункт GPS и направление его перемещения

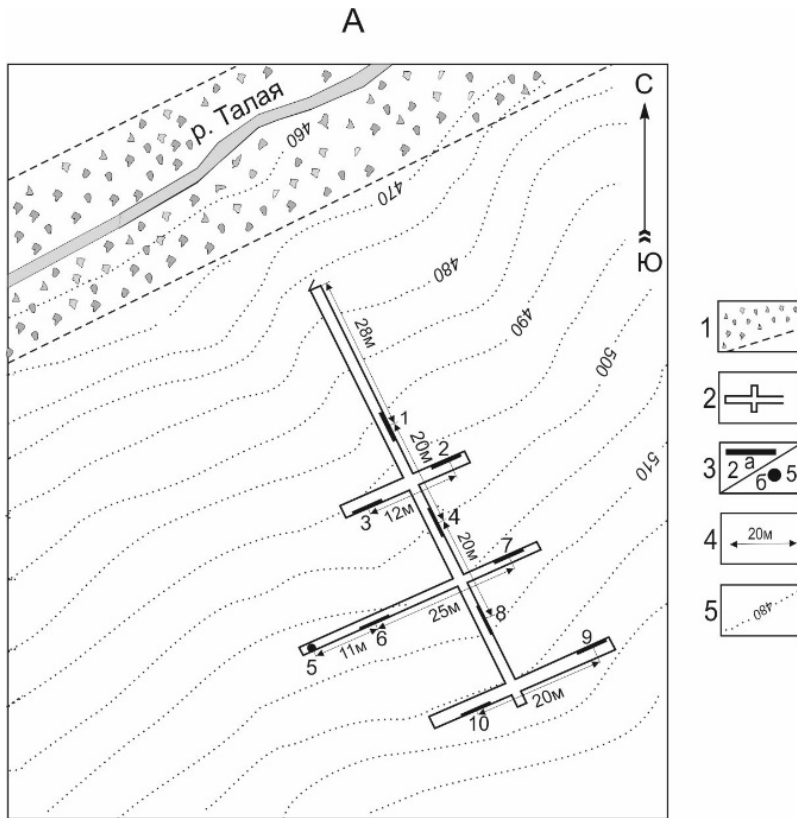


Рис. 4. Пространственная сеть штанговых датчиков в штольне пункта «Талая». 1 – зона разлома; 2 – контуры штольни; 3 – штанговые датчики, расположенные горизонтально (а), вертикально (б), и их номера; 4 – расстояния между датчиками; 5 – изолинии рельефа с указанием высоты относительно уровня моря

В течение года температура воздуха в штольне остается почти неизменной, что исключает влияния температурного фактора на результаты измерений. В ЮП на базе ИК создано четыре пункта, расположенных в южной оконечности оз. Байкал (пункт «Талая») и на его С-З побережье (пункты «Листвянка», «Бугульдейка» и «Приольхонье») (см. рис. 3, А, Б).

В трех других пунктах для минимизации влияния температурного фактора датчики размещаются в подземных бункерах разных горизонтальных размеров и высотой 1,8–2,0 м, заглубленных на 2,5–3 м и перекрытых сверху слоем грунта не менее 1 м. В пункте «Листвянка» в бункере расположена вертикальная скважина, в которую установлен штанговый датчик с базой 10 м. Таким образом, измерение деформаций горных пород здесь проводится только по вертикали. В пункте «Бугульдейка» деформации горных пород измеряются двумя горизонтальными штанговыми датчиками с базой 10 м в двух ортогональных направлениях (рис. 5). Один из датчиков ориентирован на Ю-В по направлению действия растяжения в Байкальской рифтовой зоне, обусловленного движением Забайкальского блока в Ю-В направлении. В

пункте «Приольхонье» деформации измеряются в двух пространственно разнесенных точках. Устройство первой из них аналогично устройству пункта «Листвянка», и измерения деформаций горных пород в ней проводятся вертикальным штанговым датчиком с базой 12 м. Устройство второй точки, смещенной на 140 м к Ю-В от первой, аналогично устройству пункта «Бугульдейка». Измерения деформаций в ней проводится одним горизонтальным датчиком с базой 10 м, ориентированным по направлению действия регионального растяжения в БРЗ.

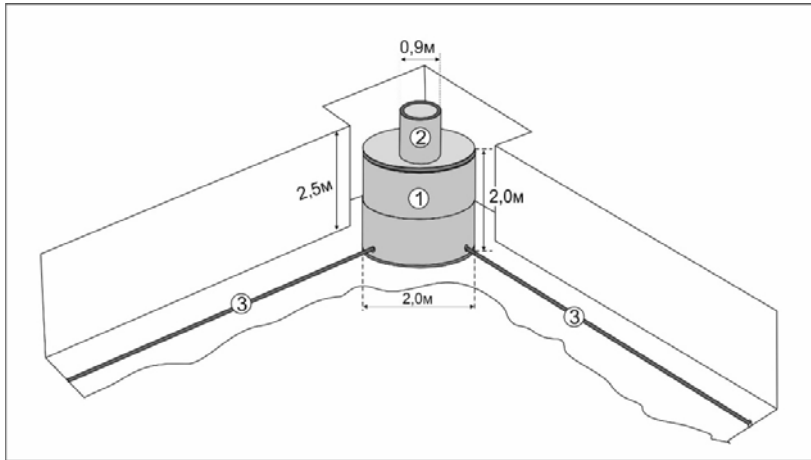


Рис. 5. Схема устройства пункта деформационного мониторинга «Бугульдейка». 1 – бокс из железобетонных колец диаметром 2 м; 2 – лаз в бокс с поверхности земли; 3 – штанговые датчики

### Структурно-геодинамические ситуации в местах расположения пунктов мониторинга

Пункты мониторинга находятся в разных структурно-геодинамических ситуациях.

Пункт «Талая» расположен в пределах южной оконечности оз. Байкал в правом крыле зоны локального разлома, проходящего по долине одноименной речки (см. рис. 3, Б). Структурная ситуация здесь определяется сочленяющимися зонами основных структурообразующих разломов – Главного Саянского и Обручевского. Геодинамика литосферы ЮП определяется сжатием, распространяющимся от области Индостанской коллизии и трансформирующимся в этом месте в Ю-В растяжение [Современные горизонтальные ... , 2014].

Пункт «Листвянка» расположен в зоне локального разлома в прибрежном блоке, ограниченном с Ю-В Обручевским разломом (см. рис. 3, В, врезка). Кристаллическое основание Южно-Байкальской впадины (ЮБВ) опущено по нему на глубину более 8 км и перекрыто 6-километровой толщиной осадочных нелитифицированных и слаболитифицированных отложений, способных передавать на прибрежный блок действующее со стороны Забайкалья Ю-В растяжение, в связи с чем деформационное воздействие на него может



передаваться только на его нижнюю часть через консолидированное основание ЮБВ. Таким образом, в пункте «Листвянка» регистрируются деформации, являющиеся опосредованным откликом зоны локального разлома на деформационные процессы в нижних частях вмещающего его блока.

Пункт «Бугульдейка» расположен в зоне сочленения двух локальных разломов в клинообразном блоке, вычленяемом крупными зонами Приморского и Морского разломов (см. рис. 3, Г). Геодинамическая ситуация здесь близка к вышеописанной ситуации для пункта «Листвянка», с той лишь разницей, что из-за небольшой амплитуды вертикального смещения по Морскому разлому кристаллическое основание Байкальской впадины в этом месте – в виде Бугульдейско-Селенгинской перемычки между ЮБВ и СБВ – опущено на меньшие глубины, а перекрывающие его осадочные отложения характеризуются небольшой мощностью [Бухаров, 1996] (см. рис. 3, Г, врезка). Действующее региональное Ю-В растяжение, так же как и в пункте «Листвянка», передается на нижние горизонты клиновидного блока. Вследствие небольшого поперечного размера и наличия широких ослабленных разломных зон во фронтальной и тыловой частях этого блока у него имеется возможность совершать маятниковые колебательные движения по направлению действия регионального растяжения.

Пункт «Приольхонье», в отличие от двух предыдущих пунктов, удален от берега Байкала на 14 км и находится вне области динамического влияния зоны Морского разлома, имеющего в этом месте большую амплитуду сбросовых смещений (см. рис. 3, Д). Как было показано выше, измерения деформаций в этом пункте проводятся в двух точках, пространственно разнесенных на 140 м и имеющих разные структурные условия в местах их расположения. Первая из них находится в зоне локального разлома, вторая – в пределах ненарушенного блока.

### **Результаты мониторинга деформаций горных пород в Южном Прибайкалье**

#### ***Основные компоненты деформаций горных пород***

Анализ полученных временных рядов данных показал, что деформации реализуются в форме колебательного процесса, с широким спектром периодов колебаний [Diagnostics of meta-instable ... , 2017]. В структуре деформаций можно выделить две группы компонент внешней и внутренней природы, порождаемые, соответственно, внешними и внутренними по отношению к Земле факторами.

Из факторов первой группы нами, на основании имеющегося фактического материала, могут быть рассмотрены лунно-солнечные приливы и вариации атмосферного давления.

Лунно-солнечные приливы проявляются в виде 12 или 24-часовых вариаций деформаций (рис. 6, А, Б). При этом 12-часовые вариации, отчетливо наблюдающиеся только в пункте «Талая», модулируются во времени в двухнедельные циклы (см. рис. 6, А, Б). Приливные деформации составляют от первых микрон до первых десятков микрон и зависят от взаимного расположения Земли, Луны и Солнца.

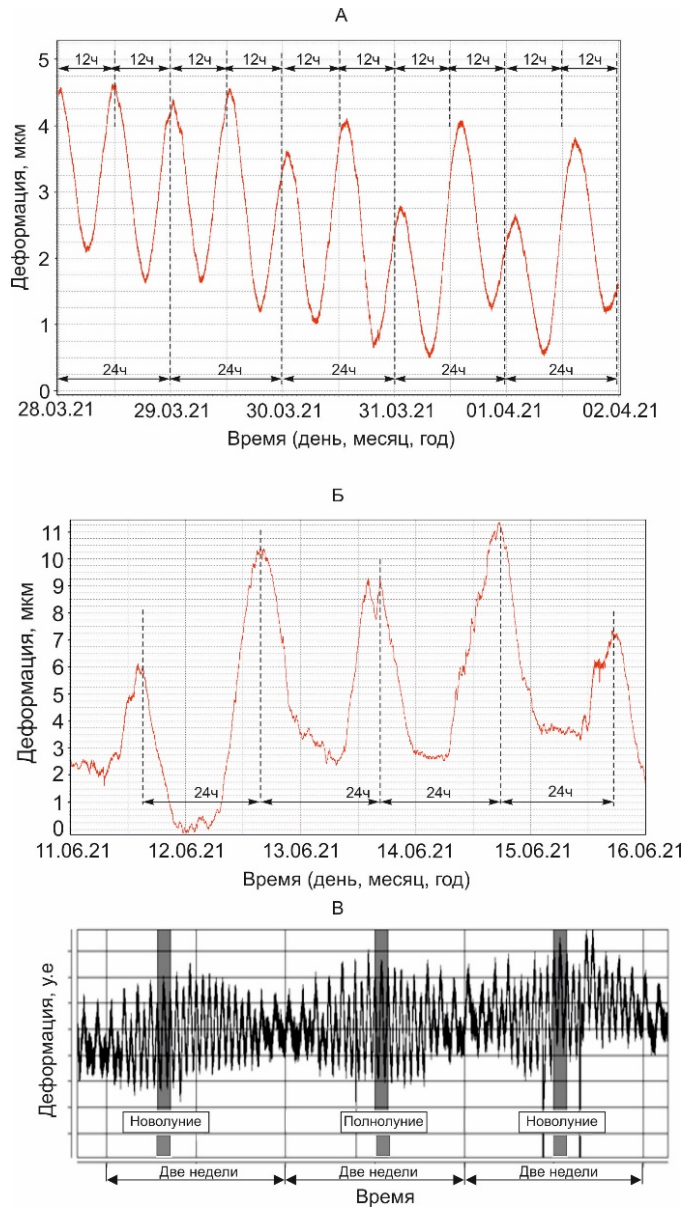


Рис. 6. 12- (А) и 24-часовые (Б) вариации деформаций, обусловленных лунно-солнечными приливами, и двухнедельные модуляции 12-часовых вариаций (В)

Деформационный отклик горных пород на вариации атмосферного давления имеет избирательный характер. Он проявляется наиболее отчетливо при его резком увеличении в виде импульсов деформаций с амплитудой от первых микрон до первых десятков микрон. Деформационный отклик горных пород на плавные изменения или резкие спады атмосферного давления проявляется слабо либо отсутствует.

Среди компонент второй группы, имеющих тектоническую природу, выделены неперIODические, случайные, и периодическая, постоянно действующая, деформации.

НеперIODические деформации проявляются в виде одиночных импульсов разной формы (рис. 7). Они возникают эпизодически и проходят через точки мониторинга как одиночные деформационные волны. Скорость их пространственной миграции непостоянна и в большинстве случаев составляет первые сантиметры – первые десятки сантиметров в секунду. Среди них можно выделить два типа деформационных волн, отличающихся по основным параметрам.

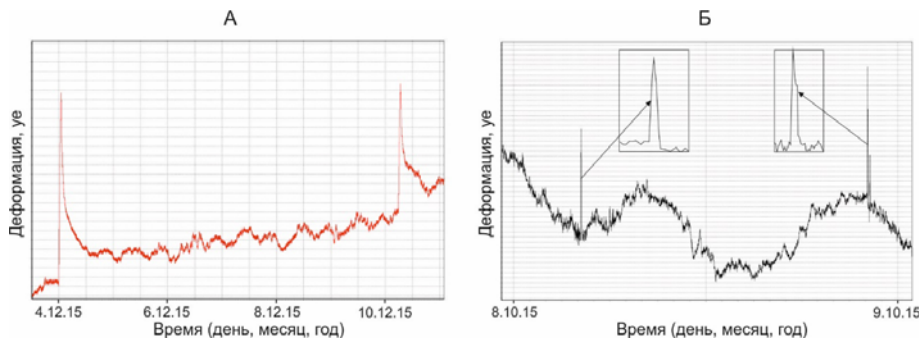


Рис. 7. Примеры импульсных изменений деформаций горных пород, обусловленных деформационными волнами первого (А) и второго (Б) типов

Деформационные волны первого типа выражены во временных рядах данных асимметричными импульсами с амплитудами в десятки микрон (рис. 7, А). Они проходят транзитом через все точки мониторинга и, как правило, сопровождаются остаточными деформациями в первые микроны. Их источники находятся за пределами пунктов мониторинга и, вероятно, порождаются треморподобными смещениями по разломам [Peng, Gomborg, 2010].

Деформационные волны второго типа представлены во временных рядах данных симметричными или асимметричными импульсами с амплитудами в первые микроны (рис. 7, Б). По сравнению с волнами первого типа они проявляются чаще, не сопровождаясь остаточными деформациями, и, предположительно, имеют локальную природу, связанную с перераспределением напряжений в разломно-блоковой структуре верхней части земной коры в пределах пунктов мониторинга.

Периодическая, постоянно действующая, деформация реализуется в виде направленно распространяющихся волн с амплитудой в первые микроны и длиной (по примерным оценкам) 400–500 м со скоростями от первых сантиметров до первых десятков сантиметров в секунду. Приведенные оценки скоростей укладываются в максимальные оценки скоростей для медленных деформационных волн (МДВ) [Быков, 2005], что позволяет инструментально зарегистрированные авторами волны отнести к этой категории. Направление и скорость их пространственной миграции меняются во времени. Так, с 2016 по 2019 г. усредненное азимутальное направление пространственной миграции этих волн в пункте «Талая» изменилось на 90° (рис. 8, А).

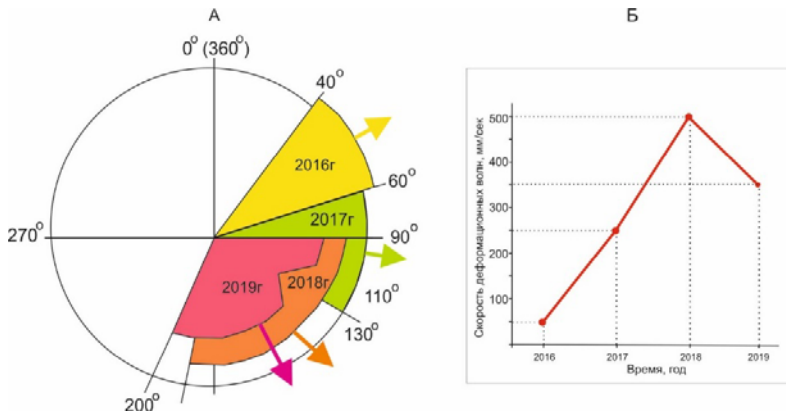


Рис. 8. Изменение усредненного вектора пространственной миграции (А) и скорости (Б) медленных деформационных волн в пункте «Талая» в 2016–2019 гг.

При этом от года к году расширялся угол сектора возможных азимутальных решений. Если в 2016 г. он составлял  $20^\circ$ , то в 2019 г. увеличился до  $110^\circ$ . Выделить преобладающее направление движения МДВ в первой половине 2020 г. не представилось возможным из-за большого разброса получаемых расчетных азимутальных направлений. Вероятно, это связано с высокой степенью дифференцированности полей деформаций в верхней части в литосфере ЮП перед Быстринским землетрясением из-за высокого уровня накопленных напряжений. Косвенным подтверждением этого может служить изменение скорости пространственной миграции волн. С 2016 по 2018 г. она выросла на порядок с 50 до 500 мм/с и снизилась в 2019 г. до 350 мм/с (рис. 8, Б).

### Особенности реализации деформаций перед сильными землетрясениями

*Култукское землетрясение 27.08.2008,  $M_w = 6,3$*

Для характеристики Култукского землетрясения использованы данные деформационного мониторинга, выполненного в штольне сейсмостанции «Талая» в 2008 г. Измерения осуществлялись штанговыми датчиками с базой 1,83 м в трех взаимно перпендикулярных направлениях – поперек и вдоль штольни (простираение  $60^\circ$  и  $150^\circ$  соответственно) и по вертикали (датчики 1, 2 и 3 соответственно) с дискретностью 30 с. На рис. 9 приведены данные мониторинга деформаций горных пород с почасовым усреднением для датчика 1, наиболее наглядно демонстрирующие особенности развития деформационного процесса перед землетрясением.

Из графика видно, что примерно за 50 сут. до землетрясения тренд 1 сменился на тренд 2 (тонкие штрихпунктирные линии), что говорит об ускорении накопления деформаций. Этот тренд сохранялся в течение 42–43 дней, сменившись за 6–7 дней до землетрясения на тренд 3 (см. рис. 9). Прекращение роста деформаций и их переход в автоколебательный режим на этом временном отрезке является признаком проявления самоорганизации в деформационном процессе (см. рис. 9, врезка).

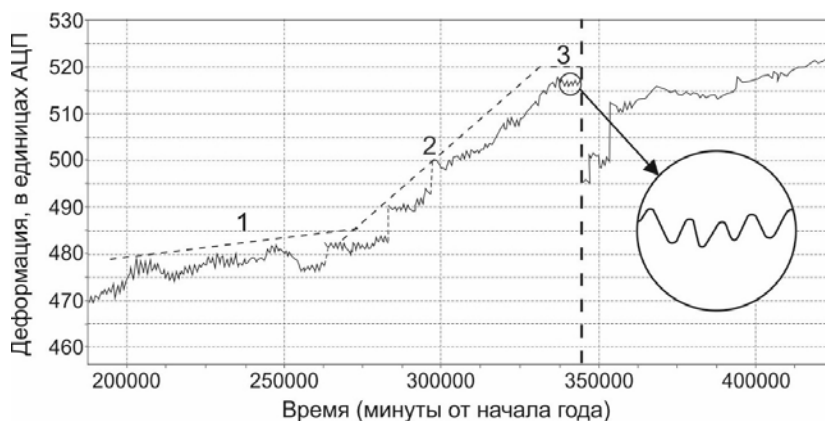


Рис. 9. Графики деформаций горных пород по показаниям датчиков 1 (А) и 3 (Б). Жирной вертикальной пунктирной линией отмечен момент землетрясения (344 732 мин)

Наличие самоорганизации в деформационном процессе подтверждается результатами обработки данных мониторинга двумя независимыми методами.

На рис. 10 в графическом виде представлены результаты обработки данных с датчика 3 методом анализа кривизн структурных функций [Vstovskiy, 2006]. Подробное описание этого метода в приложении к анализу данных деформационного мониторинга представлено в [Борняков, Встовский, 2010]. Здесь лишь отметим, что физический смысл структурной функции состоит в том, что ее рост на малых лагах означает наличие в сигнале корреляционных связей, т. е. кооперативного поведения элементов анализируемой системы, интерпретируемого как процесс их самоорганизации. И наоборот, прекращение роста структурной функции при больших лагах означает разрушение действовавших в системе корреляционных связей. Условная граница масштабов этих областей называется временем корреляции (ВК).

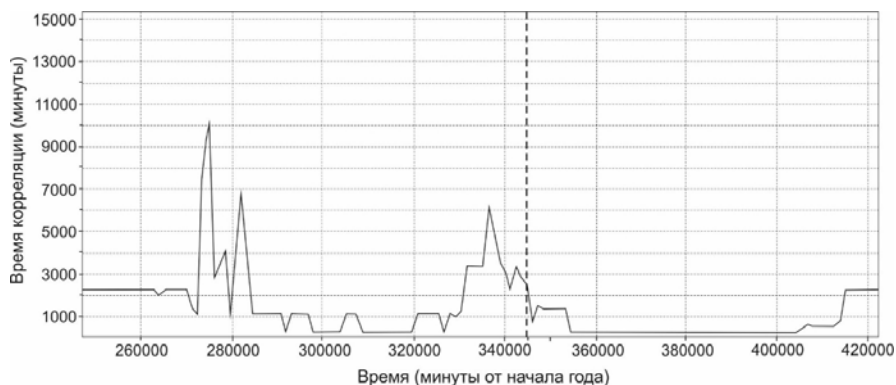


Рис. 10. График вариаций времени корреляции по данным датчика 3. Жирной вертикальной пунктирной линией отмечен момент землетрясения (344 732 мин)

В нашем случае примерно за 65 000–70 000 мин (45–50 дней) до землетрясения ВК начинает резко изменяться в широких пределах от 1000 до 10 000 мин (см. рис. 10). Наличие двух пиков в вариациях ВК во временном интервале 273 000–285 000 мин, т. е. в течение 8 дней, указывает на то, что дважды происходило появление и разрушение временных корреляций в деформационном процессе, вероятно, вызванных перестройкой поля напряжений в разломно-блоковой структуре литосферы в очаговой области. В данном случае можно говорить о проявлении среднесрочного предвестника землетрясения.

Примерно за 1 месяц (40 000–45 000 мин) до землетрясения очаговая область перешла в метастабильное состояние с ВК 100–200 мин. За 10 дней (14 700 мин) до землетрясения наблюдается резкий рост ВК с достижением значения 6200 мин за 6 дней (336 000 мин) до него (см. рис. 10). Это время можно интерпретировать как начало ранней подстадии метанестабильной стадии, в ходе которой ранее сформировавшаяся тесная коррелированность в деформационном процессе начинает разрушаться и продолжается до временной отметки 340 500 мин. Начало ее кратковременного восстановления с последующим за три дня могут быть принято за начало поздней подстадии метанестабильной стадии.

Таким образом, приведенные результаты обработки данных деформационного мониторинга посредством МАКСФ показывают, что в вариациях ВК находят отражение особенности развивающегося в разломно-блоковой среде очаговой зоны деформационного процесса. В частности, аномальный рост этого параметра указывает на развитие коррелированности во временных рядах данных, что в свою очередь является следствием наличия самоорганизации в этом процессе. Ее проявления за месяц и первые дни до Култукского землетрясения могут рассматриваться как его средне- и краткосрочный предвестники.

Другим перспективным методом, косвенно указывающим на наличие самоорганизации в деформационном процессе, является метод спектрального анализа на основе периодограммы Ломба – Скаргла [Lomb, 1976; Scargle, 1982, 1989; Savransky, 2004]. Опыт его использования авторами с подробным описанием методологии приведен в [Diagnostics of meta-instable ... , 2017]. В цитируемой работе проанализированы данные деформационного мониторинга в штольне сейсмостанции «Талая» до и после Култукского землетрясения, зарегистрированные датчиком 3. Весь временной ряд данных был разбит на следующие интервалы: 10 июня – 9 июля, 10 июля – 9 августа, 10 августа – 26 августа (предсейсмогенный период), 28 августа – 9 сентября, 10 сентября – 9 октября. Для каждой выборки данных был выполнен спектральный анализ (рис. 11). Приведенные спектрограммы показывают, что структура и интенсивность осцилляций меняется во времени, что наиболее отчетливо проявлено на периодах в интервале их значений от  $E5$  до  $8E5$ . На первой спектрограмме в этом интервале насчитывается шесть основных периодов с хаотической структурой спектра (см. рис. 11, А). В следующий временной интервал количество основных периодов увеличивается

ется до девяти, значение параметра «периодограмма» начинает уменьшаться, а в структуре осцилляций появляется элемент упорядоченности (см. рис. 11, *Б*). В третий, предсейсмогенный, интервал сокращается количество основных периодов осцилляций, продолжается уменьшение значения параметра «периодограмма», а спектрограмма имеет высокую степень упорядоченности (см. рис. 11, *В*). Линейный вид графика « $\lg$  периодограммы –  $\lg$  периода» указывает на фрактальную структуру спектра (см. рис. 11, *В*, врезка). Такая его упорядоченность свидетельствует о развитии тесной коррелированности во временном ряду данных деформаций горных пород с согласованной подстройкой колебаний по периодам и интенсивности, что с учетом приведенных выше результатов анализа исходных данных посредством МАКСФ (см. рис. 10) может трактоваться как следствие самоорганизации деформационного процесса перед землетрясением. После землетрясения стиль деформаций существенно изменился. Спектрограмма для следующего расчетного временного интервала показывает существенную хаотизацию деформационного процесса на фоне возросших значений параметра «периодограмма» (см. рис. 11, *Г*). Ведущая роль здесь принадлежит колебаниям с малыми и средними периодами в интервале их значений от 0 до  $4E5$  с, при отсутствии отчетливо выраженных большепериодных колебаний – в интервале от  $4E5$  до  $1E5$  с. В последний расчетный временной интервал проявляется тенденция возврата деформационного процесса к исходному режиму, о чем свидетельствует качественное сходство спектрограмм (см. рис. 11, *А, Д*). В дополнение отметим закономерное изменение во времени суточного периода (СП). В двух временных интервалах до землетрясения значение параметра «периодограмма» снижается с 600 до 350–400 единиц (см. рис. 11, *А, Б, В*), оставаясь на этом уровне в течение двух недель после его реализации (см. рис. 11, *Г*), затем возрастает (см. рис. 11, *Д*).

*Быстринское землетрясение 21.09.2020,  $M_w = 5,4$*

Признаки подготовки Быстринского землетрясения проявились в данных деформационного мониторинга в пункте «Талая», расположенном в 18 км от его эпицентра. За 6 дней до землетрясения восемь датчиков из десяти зарегистрировали изменение скорости накопления деформаций горных пород. Наиболее отчетливо аномальные изменения в деформационном процессе проявились на датчиках 1, 4 и 8, ориентированных на очаговую область. Для примера на рис. 12 приведен временной ряд деформаций, зарегистрированных датчиком 8 за период с 5 сентября по 2 октября 2020 г. Из графика видно, что с 5 по 16 сентября деформации на фоне 12-часовых осцилляций, обусловленных лунно-солнечными приливами, в целом уменьшились на 5 мкм. С 16 сентября снижение деформаций сменилось их ростом. При этом по мере приближения к моменту землетрясения деформационный процесс развивался с ускорением, что следует из графика посуточного приращения деформации (см. рис. 12, врезка *А*). После землетрясения деформации стали быстро уменьшаться с постепенным их выходом на фоновые значения (см. рис. 12).

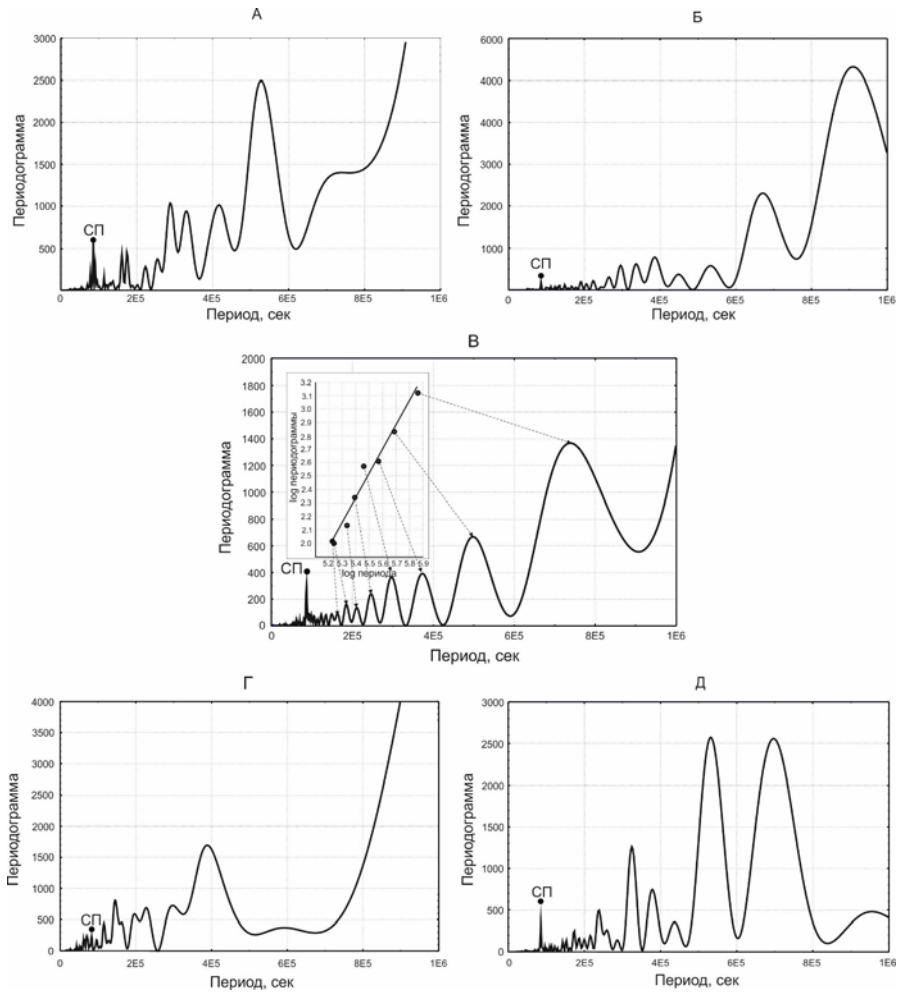


Рис. 11. Результаты спектрального анализа данных деформаций горных пород для временных интервалов: 10 июня – 9 июля (А), 10 июля – 9 августа (Б), 10 августа – 26 августа (В), 28 августа – 9 сентября (Г) и 10 сентября – 9 октября (Е). СП – суточный период

Быстринское землетрясение имело сдвиговый механизм [Быстринское землетрясение ... , 2021], его подготовка и реализация полностью соответствуют модели stick-slip в ее синергетической интерпретации [Ma, Sherman, Guo, 2012; Ma, Guo, Sherman, 2014]. Предшествующая ему динамика развития шестидневного деформационного процесса, зарегистрированного в пункте мониторинга «Талая», полностью укладывается в вышеописанные представления о ранней и поздней метанестабильности в заключительную метанестабильную стадию эволюции очага землетрясения. Деформационный процесс в первую подстадию развивался (с 16 по 20 сентября) с медленным ускорением и существенно ускорился во вторую подстадию (20 сентября) с кратковременным замедлением непосредственно перед глав-



ным толчком, произошедшим 21 сентября (см. рис. 12, врезка *А*). При этом переходе деформационного процесса в подстадию поздней метанестабильности предшествовало треморподобное смещение, отразившееся в данных деформационного мониторинга в виде продолжительного колебательного процесса (см. рис. 12, врезка *Б*).

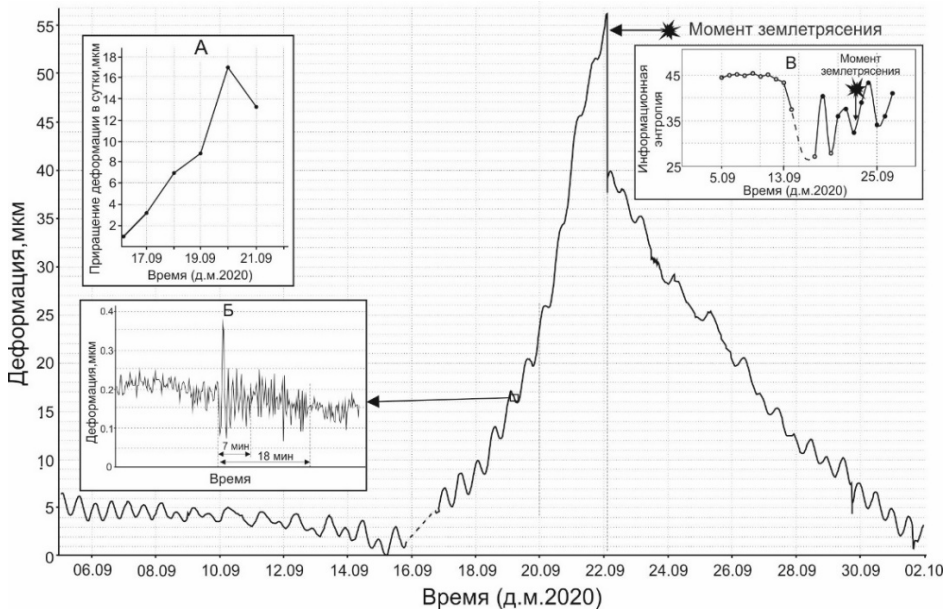


Рис. 12. График деформаций, зарегистрированных штанговым датчиком 8 с 5 сентября по 2 октября 2020 г. в штольне сейсмостанции «Галая». На врезках: А – график посуточного прироста деформаций с 16 по 22 сентября 2020 г.; Б – деформационный отклик породного массива в штольне на треморподобное смещение в очаге Быстринского землетрясения

На врезке *В* рис. 12 отображено изменение значений информационной энтропии временного ряда данных деформаций с 5 по 27 сентября. Из графика следует, что с 5 по 13 сентября информационная энтропия имела высокое значение, оставаясь почти неизменной. Это указывает на стационарность развития деформационного процесса на этом временном отрезке и его соответствие метастабильной стадии. Последующее резкое падение значений информационной энтропии между 13 и 14 сентября говорит о том, что начался переход деформационного процесса в метастабильную стадию. Это на 2–3 дня опережает отмеченное выше время такого перехода (16–17 сентября), визуально определенное по смене тренда деформаций с их уменьшения на увеличение. Из этого следует, что информационная энтропия чувствительна к тонким изменениям в структуре деформационного процесса, не всегда проявляющимся в явном виде. Дальнейшие две существенные вариации этого параметра указывают на имевшую место двойную существенную перестройку структуры деформационного процесса перед землетрясением.

Таким образом, в представленных результатах деформационного мониторинга отчетливо проявились признаки заключительной метанестабильной стадии подготовки Быстринского землетрясения, выражающиеся в характерной и закономерной динамике развития деформационного процесса. Развитие аномальных деформаций по определенному сценарию в рамках ранней и поздней метанестабильности и сопровождающие их треморподобные смещения могут рассматриваться как краткосрочные предвестники приближающегося сильного сейсмического события.

*Кударинское землетрясение 10.12.2020,  $M_w = 5,6$*

Механизмы очага Кударинского землетрясения, полученные посредством моделирования объемных и поверхностных волн разными сейсмологическими агентствами, согласуются между собой и в большинстве своем отражают обстановку растяжения коры в направлении СЗ-ЮВ со сбросовыми подвижками в очаге, иногда с незначительной сдвиговой компонентой.

Подготовка Кударинского землетрясения нашла отражение в данных деформационного мониторинга на пунктах «Бугульдейка» и «Приольхонье», расположенных напротив эпицентра на расстоянии 40 км от него (см. рис. 3, А). Несмотря на относительно небольшое расстояние между самими пунктами (26 км), признаки готовящегося землетрясения проявились в них по-разному. В первом пункте они выразились в реализации деформаций в виде синусоидальных колебаний с возрастанием их амплитуды в течение месяца, предшествующего землетрясению (рис. 13, А, Б). Во втором пункте в первой точке за десять дней до него начался экспоненциальный рост деформаций (см. рис. 3, В), аналогичный зарегистрированному в пункте «Талая» перед Быстринским землетрясением (см. рис. 12), но с отличной частотой динамики их развития во времени. Во второй точке пункта «Приольхонье» визуальных признаков подготовки землетрясения не выявлено.

Причина отличий деформационных признаков подготовки Кударинского землетрясения в пунктах «Бугульдейка» и «Приольхонье» объясняются разными структурными условиями их расположения. Пункт «Бугульдейка» находится в месте пересечения двух зон локальных разломов в пределах клиновидного блока, вычленяемого зонами региональных разломов – Приморского и Морского (см. рис. 3, Г). Как уже отмечалось, из-за существенной сбросовой амплитуды смещения по Морскому разлому верхняя часть блока с юго-восточной стороны контактирует с водной линзой и осадочным наполнением Южно-Байкальской впадины, неспособными передать на него действующее региональное растяжение. Выявленный по данным мониторинга колебательный характер деформаций перед Кударинским землетрясением имеет вторичную природу и связан с «раскачкой» блока под действием усилившегося растяжения подстилающих его более глубоких горизонтов коры (см. рис. 13, А, Б). Его колебания, начавшиеся за два месяца до землетрясения, продолжались в течение трех месяцев после него.

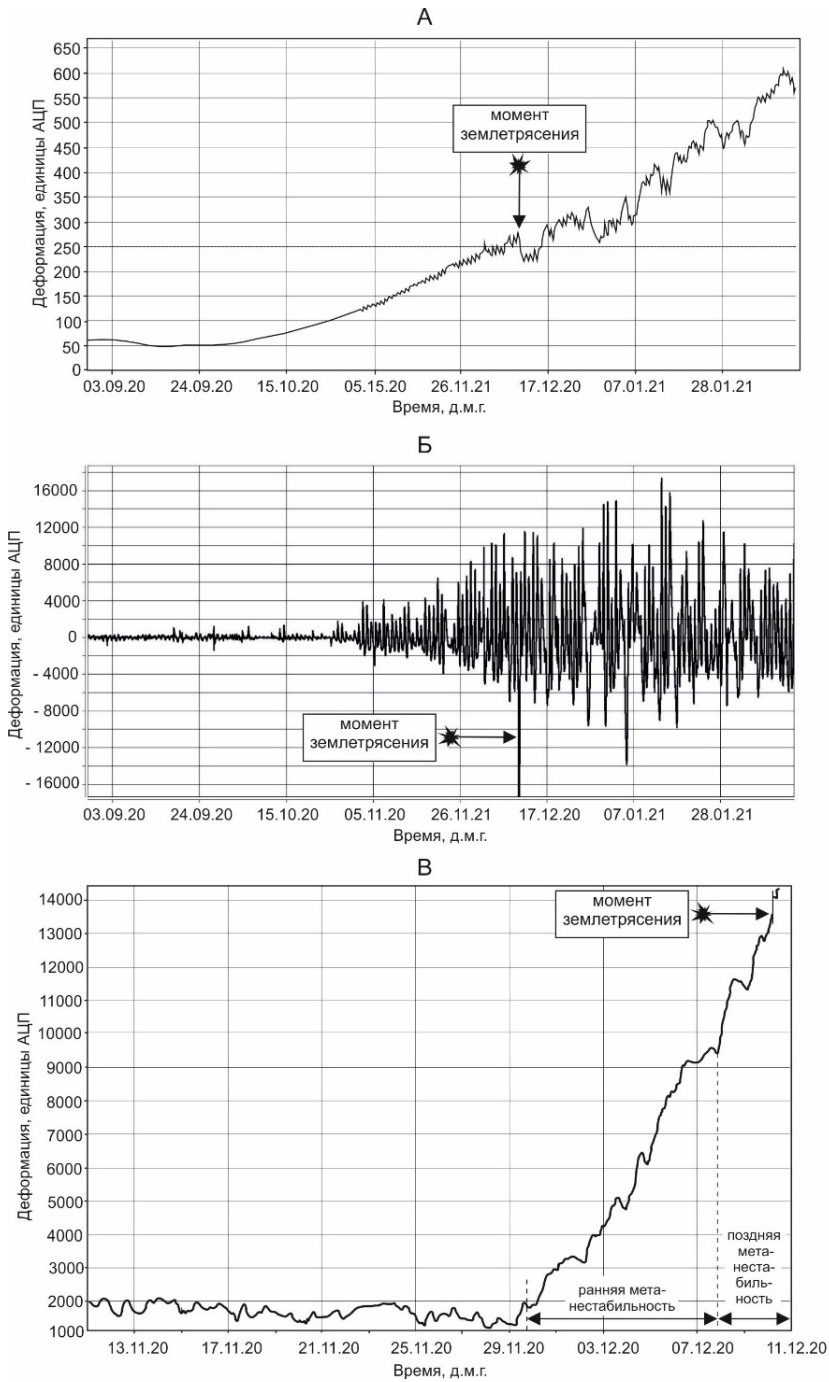


Рис. 13. Изменение деформаций горных пород во времени с тензодатчиков 1 и 2 в пункте мониторинга «Бугульдейка» до (А) и после фильтрации данных с исключением колебаний с периодом более 1 ч (Б), а также в точке 1 пункта «Приольхонье» (В)

Пункт «Приольхонье» находится в зоне локального разлома, являющегося составным структурным элементом более крупной зоны Приморского разлома. За счет удаленности пункта мониторинга от сбросового уступа Морского разлома на 14–15 км в месте его расположения уже проявляется действие регионального растяжения. В данном случае имел место отклик на процесс подготовки Кударинского землетрясения в виде резкого увеличения деформаций в точке 1, расположенной непосредственно в зоне локального разлома. Динамика развития деформаций в этой точке перед землетрясением согласуется с динамикой развития деформаций в модели stick-slip в раннюю и позднюю подстадии метанестабильной стадии [Ma, Guo, Sherman, 2014]. Во второй точке, расположенной в пределах ненарушенного блока, каких-либо аномальных изменений в деформациях не зафиксировано. Отсутствие здесь явного отклика на подготовку землетрясения обусловлено тем, что блоки, в отличие от разломов, более консервативны к действующему полю напряжений.

### Обсуждение результатов

Попытки разработки эффективного способа краткосрочного прогноза землетрясений до настоящего времени не увенчались успехом. Накопленный мировой опыт исследований в этом направлении показал, что закладываемые в основу прогнозных построений предвестники проявляются избирательно и непостоянно. Из этого следует, что краткосрочный прогноз должен базироваться на таком универсальном, неизбежном предвестнике, который проявляется всегда, если не в любых, то хотя бы в однотипных структурно-геодинамических ситуациях.

Из представленного выше концептуального подхода к созданию способа краткосрочного прогноза следует, что таким неизбежным предвестником может служить наличие самоорганизации в деформационном процессе как его неотъемлемое свойство, проявляющееся в критическом предсейсмогенном состоянии разрывно-блоковой структуры в очаговой области готовящегося землетрясения. Она имеет место за несколько дней до его реализации и может быть диагностирована прямыми или косвенными методами [Борняков, Встовский, 2010; Diagnostics of meta-unstable ... , 2017]. По отношению к ней все другие известные предвестники, не являющиеся ее производными, обладают меньшей прогнозной информативностью из-за нестабильного характера их проявления во времени и в пространстве и должны рассматриваться как второстепенные, случайные.

К таким предвестникам, фиксируемым в процессе деформационного мониторинга, следует отнести описанные выше одиночные волновые импульсы, порождаемые треморподобными смещениями в очаге, и характерные изменения параметров постоянно действующих МДВ.

Согласно экспериментальным данным, треморподобные смещения имеют место в метанестабильную стадию подготовки смещения по разрыву [Ma, Guo, Sherman, 2014; Laboratory observations ... , 2018] и в зависимости от длительности ее реализации в природной ситуации могут рассматривать-

ся как средне- или краткосрочный предвестники, что согласуется с известными инструментальными наблюдениями [Peng, Gomborg, 2010].

Постоянно действующие МДВ являются индикаторами напряженно-деформированного состояния разломно-блоковой среды. Так, азимутальное направление пространственной миграции МДВ отражает преобладающее направление действия активного вектора деформации, а увеличение скорости их миграции во времени указывает на повышение уровня напряжений в ней. По направленному изменению азимутального направления усредненного вектора деформаций в пределах ЮП 2016–2019 гг. (см. рис. 8, А) и десятикратному увеличению скорости пространственной миграции МДВ (см. рис. 8, Б) состояние литосферы в пределах ЮП в 2019 г. было оценено как предсейсмогенное. Произошедшие здесь в 2020 г. Быстринское и Кударинское землетрясения подтвердили правомерность такой оценки. Таким образом, характерные изменения во времени двух отмеченных выше параметров постоянно действующих МДВ могут рассматриваться как долгосрочные предвестники землетрясения.

Случайные предвестники, в отличие от неизбежного, подвержены влиянию разных факторов. На них влияют структурно-геодинамические условия в месте расположения пункта мониторинга и его положение относительно эпицентра землетрясения.

Влияние первых наглядно прослеживается в характере реализации деформаций в пунктах «Бугульдейка» и «Приольхонье» в преддверии Кударинского землетрясения. Несмотря на одинаковое расстояние до его эпицентра, деформации горных пород в них проявились по-разному из-за разных структурных условий в местах их расположения (см. рис. 3, 12, 13). При этом в пределах пункта «Приольхонье», как показали результаты мониторинга, землетрясению предшествовали интенсивные деформации только в точке, расположенной в зоне разлома, тогда как в точке, расположенной в смежном с ней блоке, такие деформации отсутствовали (см. рис. 13).

Влияние положения пункта мониторинга относительно эпицентра готовящегося землетрясения на характер реализации в нем деформаций демонстрирует рис. 14. На нем схематично представлены три варианта такого его положения относительно сейсмогенно активизированного сегмента разлома с левосторонней подвижкой по нему. Если пункт мониторинга находится в точке 1, то перед землетрясением в нем будет фиксироваться интенсивный рост деформации сжатия по направлению будущей сейсмогенной подвижки. Отметим, что эта ситуация полностью соответствует расположению пункта «Талая» относительно эпицентра Быстринского землетрясения (см. рис. 3, 12). Если бы пункт мониторинга располагался в точке 2, то в нем, наоборот, реализовывалась бы деформация растяжения. При промежуточном его положении в точке 3 деформации в его пределах были бы слабыми и хаотическими без явно выраженных предвестниковых признаков.

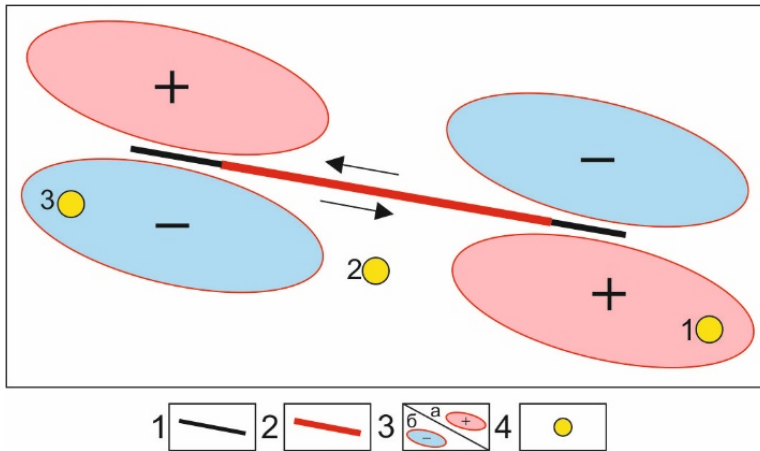


Рис. 14. Три варианта расположения пункта деформационного мониторинга относительно сейсмогенно активизированного сегмента разлома.  
 1 – разлом; 2 – сейсмогенно активизированный сегмент разлома; 3 – области горизонтального сжатия ( $a$ ) и растяжения ( $b$ ); 4 – пункт деформационного мониторинга

### Заключение

Согласно представленному выше авторскому подходу к созданию способа краткосрочного прогноза сильных землетрясений основным и неизбежным их предвестником является самоорганизация первичных микроочагов разрушения в плоскости разлома непосредственно перед его сейсмогенной активизацией. Наличие такого их кооперативного поведения может быть диагностировано по анализу данных деформационного мониторинга специальными методами, адаптированными к выявлению временных отрезков с коррелированным поведением анализируемого параметра во временном ряду таких данных. В случае сильных тектонических землетрясений этот неизбежный предвестник проявляется всегда, независимо от их механизма. Все другие предвестники, отнесенные к категории случайных, подвержены влиянию разных факторов и проявляются избирательно. Приведенные выше результаты анализа данных деформационного мониторинга показали, что такими факторами выступают структурно-геодинамические условия расположения пунктов мониторинга и их положение относительно очага землетрясения. Несмотря на избирательность действия случайных предвестников, они в совокупности с неизбежным предвестником имеют важное значение для прогнозных построений.

В целом представленные в настоящей статье результаты показывают, что предложенная синергетическая интерпретация модели stick-slip [Ma, Sherman, Guo, 2012; Ma, Guo, Sherman, 2014] наиболее адекватно описывает процесс периодической сейсмогенной активизации и может быть положена в основу разработки способа краткосрочного прогноза землетрясений.

*Исследование выполнено по проекту «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Цен-*

тральной Азии», № FWEF-2021-0009 с использованием УНУ «Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов», входящей в состав ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 21-55-53019).

### Список литературы

- Борняков С. А., Встовский Г. В. Первый опыт сейсмодеформационного мониторинга Байкальской рифтовой зоны (на примере Южно-Байкальского землетрясения 27 августа 2008 г.) // ДАН. 2010. Т. 431, № 4. С. 537–541.
- Бриллоэн Л. Научная неопределенность и информация. М. : Мир, 1966. 271 с.
- Бухаров А. А. Кайнозойское развитие Байкала по результатам глубоководных и сейсмостратиграфических исследований // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 12. С. 98–107.
- Быков В. Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 11. С. 1176–1190.
- Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020 г., Mw = 5,4): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты / Семиинский К. Ж., Борняков С. А., Добрынина А. А., Радзиминович Н. А., Рассказов С. В., Саньков В. А., Миалле П., Бобров А. А., Ильясова А. М., Салко Д. В., Саньков А. В., Семиинский А. К., Чебыкин Е. П., Шагун А. Н., Герман В. И., Тубанов Ц. А., Улзибат М. // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 727–743.
- Влияние виброимпульсных воздействий на активность смещений в трещинах горного массива / В. В. Ружич, С. Г. Псахье, Е. Н. Черных, О. В. Федеряев, А. В. Димаки, Д. С. Тирских // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10, № 1. С. 19–24.
- Зубарев Д. Н., Морозов В. Г., Рёнке Г. Статистическая механика неравновесных процессов. М. : Физматлит, 2002. 431 с.
- Изучение влияния водонасыщения и вибраций на режим смещений в зонах разломов / С. Г. Псахье, В. В. Ружич, Е. В. Шилько, С. В. Астафуров, О. П. Смекалин // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № 1. С. 23–30.
- Исследование наклонов и деформаций земной поверхности в БРЗ / В. Ю. Тимофеев, Ю. К. Саргычева, С. Ф. Панин, Л. В. Анисимова, Д. Г. Гриднев, О. К. Масальский // Геология и геофизика. 1994. Т. 3. С. 119–129.
- Мячкин В. Н. Процессы подготовки землетрясений. М. : Наука, 1978. 231 с.
- Об управлении режимами сейсмической активности в сегментах тектонических разломов с применением вибрационных воздействий и закачки растворов через скважины / В. В. Ружич, А. Г. Вахромеев, Е. А. Левина, С. А. Сверкунов, Е. В. Шилько // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23, № 3. С. 54–69.
- Пригожин И., Конденуди Д. Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур. М. : Мир, 2002. 460 с.
- Режимы отклика геологических сред при динамических воздействиях / С. Г. Псахье, В. В. Ружич, О. П. Смекалин, Е. В. Шилько // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4, № 1. С. 67–71.
- Результаты деформографических измерений в штольне на обсерватории Талая / Ю. Н. Фомин, В. М. Семибаламут, В. А. Жмудь, С. В. Панов, М. Д. Парушкин, Л. В. Димитров // Автоматика и программная инженерия. 2019. № 1(27). С. 65–75.
- Ружич В. В. Высокоточный измерительный комплекс «Сдвиг» // Научный и промышленный потенциал Сибири. Инвестиционные проекты, новые технологии разработки. Международный каталог. Новосибирск : Новосиб. биограф. центр, 2004. С. 90–91.
- Салко Д. В., Борняков С. А. Автоматизированная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах // Приборы. 2014. № 6. С. 24–28.

Современные горизонтальные движения и сейсмичность южной части Байкальской впадины (Байкальская рифтовая система) / В. А. Саньков, А. В. Лухнев, А. И. Мирошниченко, А. А. Добрынина, С. В. Ашурков, Л. М. Бызов, М.Г. Дембелов, Э. Кале, Ж. Девершер // Физика Земли. 2014. № 6. С. 70–79. <https://doi.org/10.7868/S0002333714060076>

*Тимофеев В. Ю.* Приливные и медленные деформации земной коры юга Сибири по экспериментальным данным : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2004. URL: <http://earthpapers.net/prilivnye-i-medlennye-deformatsii-zemnoy-kory-yuga-sibiri-po-eksperimentalnym-dannym#ixzz6ukGtnTat>

*Хакен Г.* Синергетика. М. : Мир, 1980. 404 с.

*Bak P., Tang C.* Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // Journal of Geophysical Research. 1989. Vol. 94, NB11. P. 15,635–15,637. <https://doi.org/10.1029/JB094iB11p15635>

*Brace W. F., Byerlee J. D.* Stick-slip as a mechanism for earthquake // Science. 1966. V. 153. P. 990–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>

*Cicerone R. D., Ebel J. E., Britton J.* A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. Vol. 476. P. 371–396. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008>

*Ciliberto S., Laroche C.* Experimental evidence of self-organization in the stick-slip dynamics of two rough elastic surface // J. Phys. I France. 1994. Vol. 4. P. 223–235. <https://doi.org/10.1051/jp1:1994134>

Diagnostics of meta-unstable state of seismically active fault / S. A. Boryakov, J. Ma, A. I. Miroshnichenko, Y. Guo, D. V. Salko, F. L. Zuev // Geodynamics & Tectonophysics. 2017. Vol. 8, N 4. P. 989–998. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0328>

Earthquake cannot be predicted / R. G. Geller, D. D. Jackson, Y. V. Ragan, F. Mulargia // Science. 1997. V. 275. P. 1616–1617. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>

*Feder H. J., Feder J.* Self-organized criticality in stick-slip process. Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 66 (20). P. 2669–2672. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.66.2669>

Fractal analysis of fractures in rocks: the Cantor's Dust method / B. Velde, J. Dubois, G. Touchard, A. Badri // Tectonophysics, 1990. Vol. 179. P. 345–352. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90300-W](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90300-W)

Laboratory observations of tremor-Like events generated during preslip / Y.-Q. Zhuo, P. Liu, S. Chen, Y. Guo, J. Ma // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45(14), P. 6926–6934.

*Lomb N. R.* Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. Astrophys. Sp. Sci. 1976. Vol. 39. P. 447–462. <https://doi.org/10.1007/BF00648343>.

*Ma J., Guo Y., Sherman S.I.* Accelerated synergism along a fault: A possible indicator for an impending major earthquake // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. Vol. 2. P. 87–99. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0134>

*Ma J., Sherman S. I., Guo Y. S.* Identification of meta-unstable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 50 bending fault // Sci. China Earth Sci. 2012. Vol. 55. P. 869–881. <http://dx.doi.org/10.1007/s11430-011-4274-2>

*Mandelbrot B. B.* The fractal geometry nature. N. Y. : Freeman, 1982. 480 p.

*Olami Z., Feder H. J. S., Christensen K.* Self-organized criticality in a continuous, non-conservative cellular automaton modeling earthquakes // Physical Review Letters, 1992. Vol. 68, N 8. P. 1244–1247. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.1244>

*Peng Z., Gomberg J.* An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // Nature geoscience, 2010. Vol. 3. P. 599–607.

*Savransky D.* Lomb (Lomb-Scargle) Periodogram. Mathlab Central, 2004. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20004-lomb--lomb-scargle--periodogram>

*Scargle J. D.* Studies in astronomical time series analysis. 2. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // The Astrophysical Journal. 1982. Vol. 263. P. 835–853.



Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. 3. Fourier transforms. Auto-correlation function and cross-correlation functions of unevenly spaced data // *The Astrophysical Journal*. 1989. Vol. 343. P. 874–887. <https://doi.org/10.1086/167757>

Vstovsky G. V. Factual revelation of correlation lengths hierarchy in micro- and nanostructures by scanning probe microscopy data // *Mater. Sci.* 2006. Vol. 12. P. 262–270.

## Methodology of Rock Deformation Monitoring in Southern Baikal Region

S. A. Bornyakov, D. V. Salko

*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation*

G. V. Vstovsky

*Central Research and Design Institute of Building Metal Structures named after N. P. Melnikov, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The Southern Baikal region is located within the limits of the actively developing Baikal rift zone (BRZ). Its seismic potential is significant, and  $M > 7$  earthquakes occur periodically with intensive shaking in the epicenters (up to 10 points). The problem of prediction and forecasting of strong earthquakes has always been critical for this region, considering its increasing urbanization, industrial clusters and transport systems. The article describes the methodology based on rock deformation monitoring data, which aims at developing a technology capable of efficient prediction and forecasting of strong earthquakes. The technology is based on the stick-slip model developed by W. Brace and J. Byerlee and its synergetic interpretation proposed by Ma J. et al. This model shows the preparation of the earthquake source in stages, which is reflected in deformation monitoring data. An integral property of the deformation process is its self-organization right before an earthquake. The self-organization, that always takes place before a seismic event, is considered by the authors as an inevitable short-term precursor. All other indicators that occur randomly are considered occasional precursors. The article is focused on the methodology aspects and describes the technical details of measuring the rock deformation. It presents the proven methods of data processing with the major goal of detecting the inevitable precursor. Described in detail are the structural-geodynamic conditions of the locations of rock deformation monitoring points in the study area. The main results are based on the rock deformation records taken before three strong earthquakes in the study area – Kultuk (August 27, 2008), Bystrinskoe (September 21, 2020), and Kudara (December 10, 2020) earthquakes. The study shows that, in contrast to the inevitable precursor, the occasional precursors are manifested depending on the geodynamic conditions of the earthquake source preparation, the position of the monitoring point relative to the source, and the structural conditions of the monitoring point location.

**Keywords:** earthquake, forecasting, prediction, rock deformation, monitoring.

**For citation:** Bornyakov S.A., Salko D.V., Vstovsky G.V. Methodology of Rock Deformation Monitoring in Southern Baikal Region. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2021, vol. 38, pp. 13–40. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.38.13> (in Russian)

### References

Bornyakov S.A., Vstovsky G.V. Pervyj opyt sejsmodeformatsionnogo monitoringa Bajkal'skoj riftovoj zony (na primere Juzhno-Bajkalskogo zemletrjasenija 27 avgusta 2008g) [The first experience of seismic deformation monitoring of the Baikal rift zone (on the exam-

ple of the South Baikal earthquake on August 27, 2008)]. *Doklady AN* [Reports of the Academy of Sciences], 2010, vol. 431, no. 4, pp. 537-541. (in Russian)

Brillouin L. *Nauchnaja neopredelennost i informatsija* [Scientific Uncertainty and Information]. Moscow, Mir Publ., 1966, 271 p. (in Russian)

Bukharov A.A. Kajnozojskoe razvitie Bajkala po rezultatam glubokovodnyh i sejsmostratigraficheskikh issledovanij [Cenozoic development of Baikal based on the results of deep-water and seismostratigraphic studies. *Geologija i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1996, vol. 37, no. 12, pp. 98-107. (in Russian)

Bykov V.G. Deformatsionnye volny Zemli: kontseptsija, nabljudenija i modeli [Deformation waves of the Earth: concept, observations and models]. *Geologija i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2005, vol. 46, no. 11, pp. 1176-1190. (in Russian)

Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., Sankov V.A., Mialle P., Bobrov A.A., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Seminsky A.K., Chebykin E.P., Shagun A.N., German V.I., Tubanov Ts.A., Ulzibat M. Bystrinskoe zemletrjasenie v Juzhnom Pribajkal'e (21.09.2020 g., Mw = 5.4): osnovnye parametry, priznaki podgotovki i soprovozhdajuschie `effekty [Bystrinskoe earthquake in the Southern Baikal region (September 21, 2020, Mw = 5.4): main parameters, preparation indicators and accompanying effects]. *Geologija i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2021, vol. 62, no. 5, pp. 727-743. (in Russian)

Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Federyaev O.V., Dimaki A.V., Tirskikh D.S. Vlijanie vibroimpul'snyh vozdeystvij na aktivnost' smeschenij v treschinah gornogo massiva [Influence of vibration pulse effects on the activity of displacements in the cracks of a rock massif]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics Journal], 2007, vol. 10, no. 1, pp. 19-24. (in Russian)

Zubarev D.N., Morozov V.G., Repke G. *Statisticheskaja mehanika neravnovesnyh protsessov*. [Statistical Mechanics of Nonequilibrium Processes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 431 p. (in Russian)

Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V., Astafurov S.V., Smekalin O.P. Izuchenie vlijaniya vodonasyschenija i vibratsij na rezhim smeschenij v zonah razlomov [Study of the influence of water saturation and vibrations on the mode of displacements in fault zones *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2004, vol. 7, no. 1, pp. 23-30. (in Russian)

Timofeev V.Yu., Sarycheva Yu.K., Panin S.F., Anisimova L.V., Gridnev D.G., Masalsky O.K. Issledovanie naklonov i deformatsij zemnoj poverhnosti v BRZ [Investigation of slopes and deformations of the Earth's surface in BRZ] *Geologija i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2021, 1994, vol. 3, pp. 119-129. (in Russian)

Myachkin V.N. *Protsessy podgotovki zemletrjasenij* [Earthquake Preparation Processes]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 231 p. (in Russian)

Ruzhich V.V., Vakhromeev A.G., Levina E.A., Sverkunov S.A., Shilko E.V. Ob upravlenii rezhimami sejsmicheskoy aktivnosti v segmentah tektonicheskikh razlomov s primeneniem vibratsionnyh vozdeystvij i zakachki rastvorov cherez skvazhiny [On the control of seismic activity in the segments of tectonic faults with the use of vibration effects and injection of solutions through wells]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2020, vol. 23, no. 3, pp. 54-69. (in Russian)

Prigogine I., Kondepudi D. *Sovremennaja termodinamika: ot teplovyh dvigatelej do dissipativnyh struktur* [Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures], Moscow, Mir Publ., 2002, 460 p. (in Russian)

Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Smekalin O.P., Shilko E.V. Rezhimy otklika geologicheskikh sred pri dinamicheskikh vozdeystvijah [Response modes of geological environments under dynamic influences. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2001, vol. 4, no. 1, pp. 67-71. (in Russian)

Fomin Yu.N., Semibalamut V.M., Zhmud V.A., Panov S.V., Parushkin M.D., Dimitrov L.V. Rezultaty deformograficheskikh izmerenij v shtol'ne na observatorii Talaja [Results of

deformographic measurements in an adit at the Talaya observatory]. *Avtomatika i programnaya inzheneriya* [Automation and Software Engineering], 2019, no. 1 (27), pp. 65-75. (in Russian)

Ruzhich V.V. Vysokotochnyj izmeritel'nyj kompleks "Sdvig" [High-precision measuring complex "Shift"]. *Nauchnyi i promyshlennyi potentsial Sibiri. Investitsionnye proekty, novye tekhnologii razrabotki. Mezhdunarodnyi katalog* [Scientific and Industrial Potential of Siberia. Investment Projects and New Development Technologies. International Catalogue]. Novosibirsk, CJSC Novosibirsk Biographical Center Publ., 2004. pp. 90-91. (in Russian)

Salko D.V., Borneyakov S.A. Avtomatizirovannaja sistema dlja monitoringa geofizicheskikh parametrov na geodinamicheskikh poligonah [Automated system for monitoring geophysical parameters at geodynamic test sites. *Pribory* [Equipment], 2014, no. 6, pp. 24-28. (in Russian)

Sankov V.A., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Dobrynina A.A., Ashurkov S.V., Byzov L.M., Dembelov M.G., Kale E., Deversher J. Sovremennye gorizonttal'nye dvizhenija i sejsmichnost' juzhnoj chasti Bajkal'skoj vpadiny (Bajkal'skaja riftovaja sistema) [Modern horizontal movements and seismicity of the southern part of the Baikal depression (Baikal rift system)]. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth], 2014, no. 6, pp. 70-79. (in Russian) <https://doi.org/10.7868/S0002333714060076>

Timofeev V.Yu. *Prilivnye i medlennye deformatsii zemnoj kory juga Sibiri po `eksperimental'nym dannym* [Tidal and Slow Deformations of the Earth's Crust in Southern Siberia According to Experimental Data. Brief PhD Thesis. Cand. sci. diss. abstr.]. Novosibirsk, 2004. Available at: <http://earthpapers.net/prilivnye-i-medlennye-deformatsii-zemnoy-kory-yuga-sibiri-po-eksperimentalnym-dannym#ixzz6ukGtnTat> (in Russian)

Haken H. *Sinergetika* [Synergetics]. Moscow, Mir Publ., 1980. 404 p. (in Russian)

Bak P., Tang C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *J. Geoph. Res.*, 1989, vol. 94, no. B11, pp. 15,635-15,637.

Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake. *Science*, 1966, vol. 153, pp. 990-992.

Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 2009, vol. 476, pp. 371-396.

Ciliberto S., Laroche C. Experimental evidence of self-organization in the stick-slip dynamics of two rough elastic surface. *J. de Phys. I France*, 1994, vol. 4, pp. 223-236.

Borneyakov S.A., Ma J., Miroshnichenko A.I., Guo Y., Salko D.V., Zuev F.L. Diagnostics of meta-instable state of seismically active fault. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 989-998. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0328>

Geller R.G., Jackson D.D., Ragan Y.V., Mulargia F. Earthquake cannot be predicted. *Science*, 1997, vol. 275, pp. 1616-1617.

Feder J.S., Feder J. Self-organized criticality in stick-slip process. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, vol. 66 (20), pp. 2669-2672.

Velde B., Dubois J., Touchard G., Badri A. Fractal analysis of fractures in rocks: the Cantor's Dust method. *Tectonophysics*, 1990, 179. P. 345-352.

Zhuo Y.-Q., Liu P., Chen S., Guo Y., Ma J. Laboratory observations of tremor-Like events generated during preslip. *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, no. 14, pp. 6926-6934.

Lomb N.R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys. Sp. Sci.*, 1976, vol. 39, pp. 447-462.

Ma J., Guo Y., Sherman S.I. Accelerated synergism along a fault: A possible indicator for an impending major earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2014, vol. 2, pp. 87-99.

Ma J., Sherman S.I., Guo Y.S. Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a bending fault. *Sci. China Earth Sci.*, 2012, vol. 55, pp. 869-881.

Mandelbrot B.B. *The fractal geometry nature*. N.Y., Freeman, 1982, 480 p.

Olami, Z., Feder, H.J.S., Christensen, K. Self-organized criticality in a continuous, non-conservative cellular automaton modeling earthquakes. *Physical Review Letters*, 1992, vol. 68 (8), pp. 1244-1247.

Peng, Z. Gombert J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena. *Nature geoscience*, 2010, vol. 3, pp. 599-607.

Savransky D. *Lomb (Lomb-Scargle) Periodogram*. Matlab Central, 2004. Available at: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20004-lomb--lomb-scargle--periodogram>

Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. 2. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *The Astrophysical Journal*, 1982, vol. 263, pp. 835-853.

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, vol. 343, pp. 874-887.

Vstovsky G.V. Factual Revelation of Correlation Lengths Hierarchy in Micro- and Nanostructures by Scanning Probe Microscopy Data. *Mater. Sci. (Kaunas)*, 2006, vol. 12, pp. 262-270.

**Борняков Сергей Александрович**  
старший научный сотрудник  
кандидат геолого-минералогических наук  
Институт земной коры СО РАН  
Россия, 664033, г. Иркутск,  
ул. Лермонтова, 128  
e-mail: bornyak@crust.irk.ru

**Bornyakov Sergei Alexandrovich**  
Senior Research, Candidate of Sciences  
(Geology and Mineralogy)  
Institute of the Earth's Crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: bornyak@crust.irk.ru

**Салко Денис Владимирович**  
ведущий инженер  
Институт земной коры СО РАН  
Россия, 664033, г. Иркутск,  
ул. Лермонтова, 128  
e-mail: denis@salko.net

**Salko Denis Vladimirovich**  
Lead Engineer  
Institute of the Earth's Crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: denis@salko.net

**Встовский Григорий Валентинович**  
главный научный сотрудник, доктор  
физико-математических наук  
Центральный научно-исследовательский  
и проектный институт строительных  
металлоконструкций им. Н. П. Мельникова  
117393, Москва, ул. Архитектора Власова,  
49  
e-mail: vstovsky@gmail.com

**Vstovskij Grigorij Valentinovich**  
Chief Scientist, Doctor of Sciences  
(Physics and Mathematics)  
Central Research and Design Institute  
of Building Metal Structures  
named after N.P. Melnikov  
49, Arkhitektora Vlasov st., 117393, Moscow,  
Russian Federation  
e-mail: vstovsky@gmail.com

Код научной специальности: 25.00.03

Дата поступления: 04.07.2021