



МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОСТОЯНИЯ БЛОЧНОЙ СЕЙСМОГЕННОЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ АКТИВИЗАЦИИ 2008–2011 ГГ. В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

П.Г. Дядьков^{1,2}, Ю.М. Романенко^{1,2}, М.П. Козлова^{1,2}, Л.В. Цибизов^{1,2}, А.А. Дучкова¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия,
e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Предложены подходы к оценке состояния блочной сейсмогенной среды на основе совместного анализа ряда параметров сейсмического режима, таких как аномалии выделения сейсмической энергии: затишья и активизации, наклон графика повторяемости (*b*-value), сейсмическая активность A_{10} . Апробация методики выполнена на примере подготовки и развития сейсмической активизации 2008-2011 гг. в центральной части Байкальского рифта, во время которой произошли два сильных землетрясения с $M=5.3$. Выявлено, что в течение 2-х лет перед сильным Максимихинским землетрясением 2008 г. в земной коре эпицентральной области происходил переход от разупрочнения к упрочнению (консолидации) блочной среды. При этом в соседней области (район полуострова Святой Нос) наблюдался прямо противоположный характер изменений.

Байкальский рифт, сейсмический режим, подготовка землетрясения, b-value, сейсмическое затишье, блочная среда, упрочнение, среднесрочный прогноз

METHODOLOGICAL APPROACHES TO DETERMINING THE STATE OF BLOCK SEISMOGENIC MEDIUM ON THE EXAMPLE OF THE 2008-2011 SEISMIC ACTIVATION IN THE CENTRAL PART OF THE BAIKAL RIFT

P.G. Dyadkov^{1,2}, Y.M. Romanenko^{1,2}, M.P. Kozlova^{1,2}, L.V. Tsibizov^{1,2}, A.A. Duchkova¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova str., 2, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Based on the joint analysis of the seismic regime parameters, such as anomalies of seismic energy release, *b*-value, seismic activity A_{10} , approaches to assess the state of the block-seismic medium are proposed. The method validation was done for the example of preparation and development of seismic activity in 2008-2011 in the Central part of the Baikal rift, during which there were 2 strong $M5.3$ earthquakes. It was found that within 2 years before the strong Maximihinskoye Earthquake of 2008 in the Earth's crust of the epicentral region there is a transformation from softening to strengthening

(consolidation) of the block medium. At the same time, in the neighboring region (the area of the Svyatoy Nos Peninsula), the opposite nature of the changes is observed.

Baikal rift, seismic regime, earthquake preparation, b-value, seismic quiescence, block medium, hardening, medium-term forecast

ВВЕДЕНИЕ

Информация об изменении состояния среды является определяющей для понимания физики процессов, происходящих при подготовке землетрясений, и разработки соответствующих моделей. При этом требуется учитывать дискретность сейсмогенной среды (ее блочное строение) и, по возможности, ее реологическую неоднородность.

В 2008–2011 гг. в районе центральной части байкальской впадины произошли два крупных сейсмических события: Максимихинское, 20 мая 2008 г., $M=5.3$, с эпицентром на акватории оз. Байкал близ мыса Горевой [Гилева и др., 2014], и Туркинское, 16 июля 2011 г., $M=5.3$, в хребте Улан-Бургасы [Мельникова и др., 2013; Гилева и др., 2017] (рис. 1).

В данной работе применены подходы к оценке состояния сейсмогенной среды на основе расчета и совместного анализа параметров сейсмического режима, таких как аномалии выделения сейсмической энергии, сейсмическая активность A_{10} и наклон графика повторяемости землетрясений (закон Гутенберга–Рихтера) [Gutenberg, Richter, 1944].

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматривая относительно сильное Максимихинское землетрясение 20 мая 2008 г., $M_w=5.3$, нельзя не отметить, что район Среднего Байкала, где произошло данное событие, традиционно считается высокосейсмичным [Мельникова и др., 2013]. Очаговая область этого землетрясения находится в обстановке сдвига с небольшой сбросовой компонентой [Гилева, Мельникова, 2014]. Оценка фокальных механизмов других землетрясений афтершоковой последовательности этого события показал, что в большинстве случаев в очагах доминирует типичное для центральных частей Байкальского рифта субгоризонтальное северо-западное растяжение.

Рифтовый фокальный механизм другого сильного сейсмического события этой активизации – Туркинского землетрясения 16 июля 2011 г., $M_w=5.3$, и отдельных его афтершоков свидетельствует о доминирующем влиянии в этом районе хребта Улан-Бургасы режима субгоризонтального растяжения, ориентированного вкрест простиранья основных геоструктур [Гилева и др., 2017].

Важно отметить, что в районе эпицентральной области Максимихинского землетрясения сильные землетрясения с $M \geq 5$ не происходили в радиусе ~ 40 км по крайней мере в последние 70 лет. Соседний участок – район полуострова Святой Нос – наоборот является концентратором событий с $M \sim 5-6$. За этот же период здесь произошло пять событий такой интенсивности.

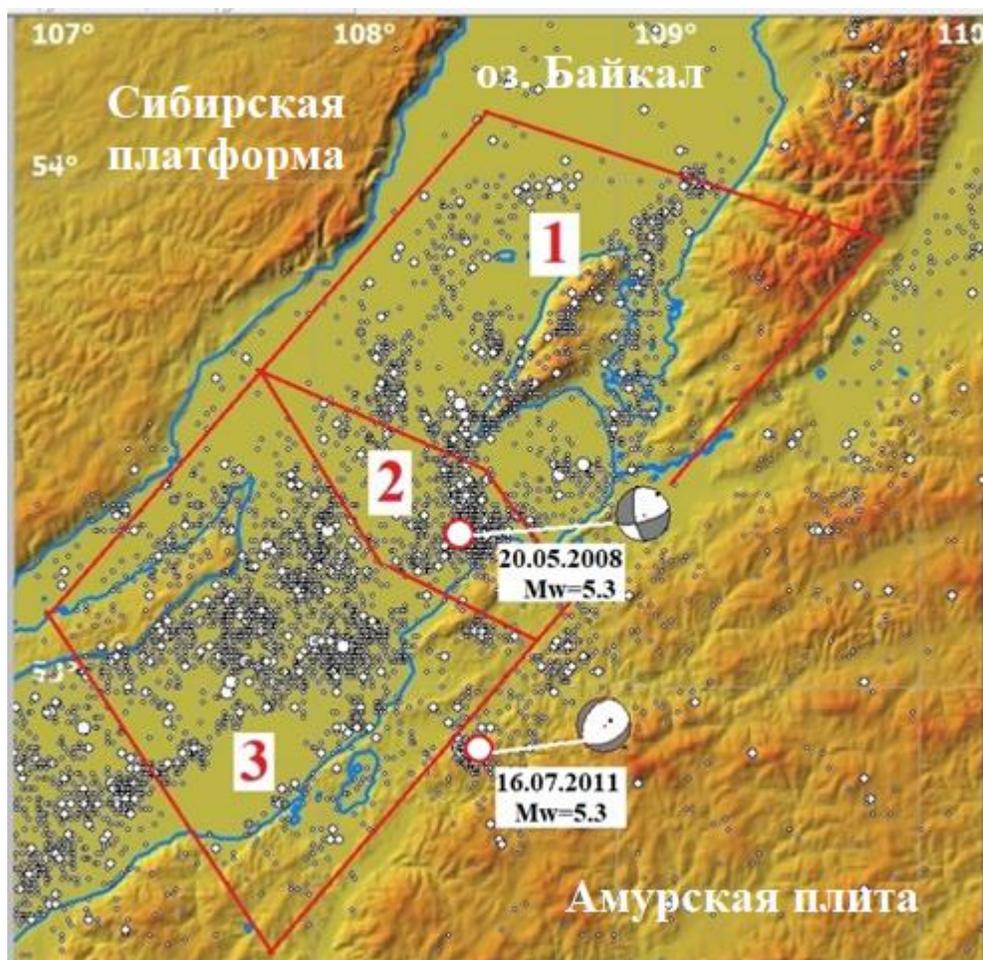


Рис. 1. Карта Среднего Байкала с нанесенными эпицентрами землетрясений с $M=1.5-5.3$ за 2001–2014 гг. (белые кружки и серые точки), с эпицентрами Максимихинского, 2008 г., и Туркинского, 2011 г., землетрясений и механизмами их очагов. Красными линиями выделены участки, для которых выполнялись расчеты значений наклона графика повторяемости

МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Для определения значений параметров графика повторяемости землетрясений, выражающего закон Гутенберга – Рихтера (формула 1), использовался метод построения линейной зависимости между IgN и магнитудой M на основе минимизации среднеквадратичного отклонения

$$IgN = a - bM, \quad (1)$$

где N – количество событий, a и b – коэффициенты, определяющие уровень сейсмической активности и наклон графика повторяемости.

Анализ сопоставления двух способов определения наклона графика повторяемости: по среднеквадратичному отклонению и по методу максимального правдоподобия, показал, что при больших N оба способа дают практически одни и те же значения параметра b-value [Шумилина, 1978].

Выбор представительных сейсмических событий для построения графика повторяемости землетрясений и определения параметра b-value осуществлялся на основе анализа регионального каталога землетрясений Байкальского филиала ГС РАН. При этом выполнялся анализ изменений количества событий низких энергетических классов в различные периоды, а также определялась минимальная магнитуда, с которой начиналось отклонение от прямолинейной зависимости в левой части графика повторяемости землетрясений. Кроме этого, принимались во внимание изменения в структуре сети сейсмических станций этого региона. Наилучшую представительность событий имеет период с 2001 г. по настоящее время, поскольку сеть сейсмических станций Байкальского филиала ГС РАН в этом районе дополнилась несколькими станциями Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Поэтому определение значений b-value для построения графиков его изменений во времени выполнялось для периода 2001–2014 гг. Афтершоковые последовательности не удалялись при расчетах b-value.

Выполненный анализ показал, что для рассматриваемого района исследований и выбранного периода 2001–2014 гг. уверенно представительными являются события с $M \geq 1.4 - 1.5$.

Аномалии выделения сейсмической энергии (сейсмические затишья и активизации) рассчитывались на основе методики SEQ [Дядьков, Кузнецова, 2008; Романенко, Дядьков, 2017], которая определяет степень дефицита или превышения выделяемой энергии на единицу площади за определенный период времени (например, год) относительно нормы, определяемой за длительный интервал времени.

Сейсмическая активность A_{10} определялась по стандартной методике [Сейсмическая сотрясаемость..., 1979]. Расчет всех вышеперечисленных параметров производился в геоинформационной системе EEDB [Dyadkov, Mikheeva, 2010].

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА СРЕДНЕМ БАЙКАЛЕ

Пространственные изменения значений наклона графика повторяемости и сейсмической активности. На первом этапе предпримем попытку качественной оценки пространственного распределения прочностных свойств (консолидованности) блочной среды исследуемого района Среднего Байкала. При этом используем известную зависимость между наклоном графика повторяемости землетрясений и прочностью (степенью консолидованности) блочной среды [Арефьев и др., 1989; Виноградов, Пономарев, 1999; Hatzidimitriou et al., 1985]. Кроме этого, необходимо помнить о возможном влиянии на величину наклона графика повторяемости и другого параметра – интенсивности и типа напряженного состояния [Kuznetsova et al., 1981; Schorlemmer et al., 2005]. Но отметим, что эти параметры, в свою очередь, также зависят от степени консолидованности блочной среды.

Будем определять значения наклона графика повторяемости b-value для отдельных участков земной коры Среднего Байкала и отдельных интервалов времени на основе построения и расчета параметров этого графика, выражающего закон Гутенберга–Рихтера (1).

На рис. 1 выделены три участка Среднего Байкала. Они фактически пересекают вкрест простираения впадину оз. Байкал с выходом на относительно асейсмичные области Восточно-Сибирской платформы на северо-западе и Амурской плиты на юго-востоке.

Для каждого из этих участков по данным регионального каталога Байкальского филиала ГС РАН для периода 2001–2014 гг. определялись значения параметра b -value графика повторяемости землетрясений. Выборка сейсмических событий для построения графика осуществлялась по следующим критериям: нижний предел магнитуд определялся представительностью событий, а верхний – по статистической значимости количества событий. Обычно эти пределы находились в рамках $M = 1.5 \div 3.5$. Полученные значения b -value были следующими: $b = 0.96 \pm 0.01$ – северный участок (1); $b = 1.12 \pm 0.01$ – участок, включающий эпицентральную область (2); $b = 1.05 \pm 0.01$ – юго-западный участок (3).

Эпицентральная область Туркинского землетрясения 2011 г. не включалась в участки, для которых выполнялись расчеты параметра b -value, ввиду малого количества сейсмических событий в этом районе, что не позволяет рассчитать этот параметр с необходимой точностью.

Полученные значения b -value для выделенных на рис. 1 участков указывают на то, что северный участок (1) является более консолидированным (условно более прочным), чем два других. Самым ослабленным является 2-й участок, включающий будущую зону очага. Будущая эпицентральная область Максимихинского землетрясения показывает еще более высокие значения $b \sim 1.24 \pm 0.02$ за период 2000–2006 гг. с некоторым понижением в 2007 г. непосредственно перед главным событием.

Причиной повышенных значений параметра b -value в этой зоне может являться ее несколько более высокая сейсмическая активность (по сравнению с ближайшим окружением), особенно в последние 5 лет перед землетрясением, за счет большого количества событий низких энергий, как правило не превышающих $M=3$. Существенно более слабая сейсмичность ее ближайшего окружения (кроме аппендикса в северном направлении, соединяющего будущую эпицентральную область с областью повышенной активности у южной оконечности п-ва Святой Нос) может свидетельствовать о том, что эта будущая эпицентральная область с несколько повышенной сейсмической активностью окружена более жесткой блочной средой (рис. 1 и 2).

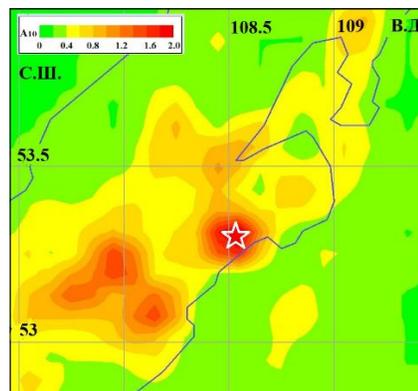
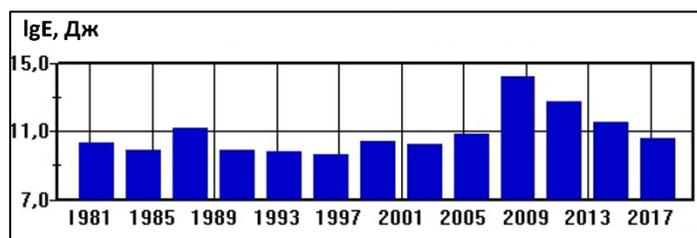


Рис. 2. Выделение сейсмической энергии за 4-летние интервалы времени с 1980 по 2017 гг. в эпицентральном области Максимихинского землетрясения 2008 г. с $M=5.3$ (слева) и сейсмическая активность A_{10} в исследуемом регионе за 5-летний период перед этим землетрясением (отмечено звездочкой) с 1 января 2003 г. по 19 мая 2008 г. (справа)

Изменения сейсмической активности и значений наклона графика повторяемости во времени. Ранее нами было выявлено, что Максимихинскому и Туркинскому землетрясениям предшествовало сейсмическое затишье в 2001–2004 гг., которое окаймляло будущую зону активизации 2008–2011 гг. [Дядьков и др., 2017]. Развитие северной части этого затишья, наиболее дефицитной по уровню выделения сейсмической энергии, территориально приуроченной к п-ву Святой Нос, отслеживалось нами в реальном масштабе времени (рис. 3) [Дядьков, Кузнецова, 2008]. Распад затишья был приурочен к умеренной активизации (ряд событий с $M \sim 4 - 4.5$), происшедшей в 2005–2006 гг. в районе п-ва Святой Нос (см. рис. 3).

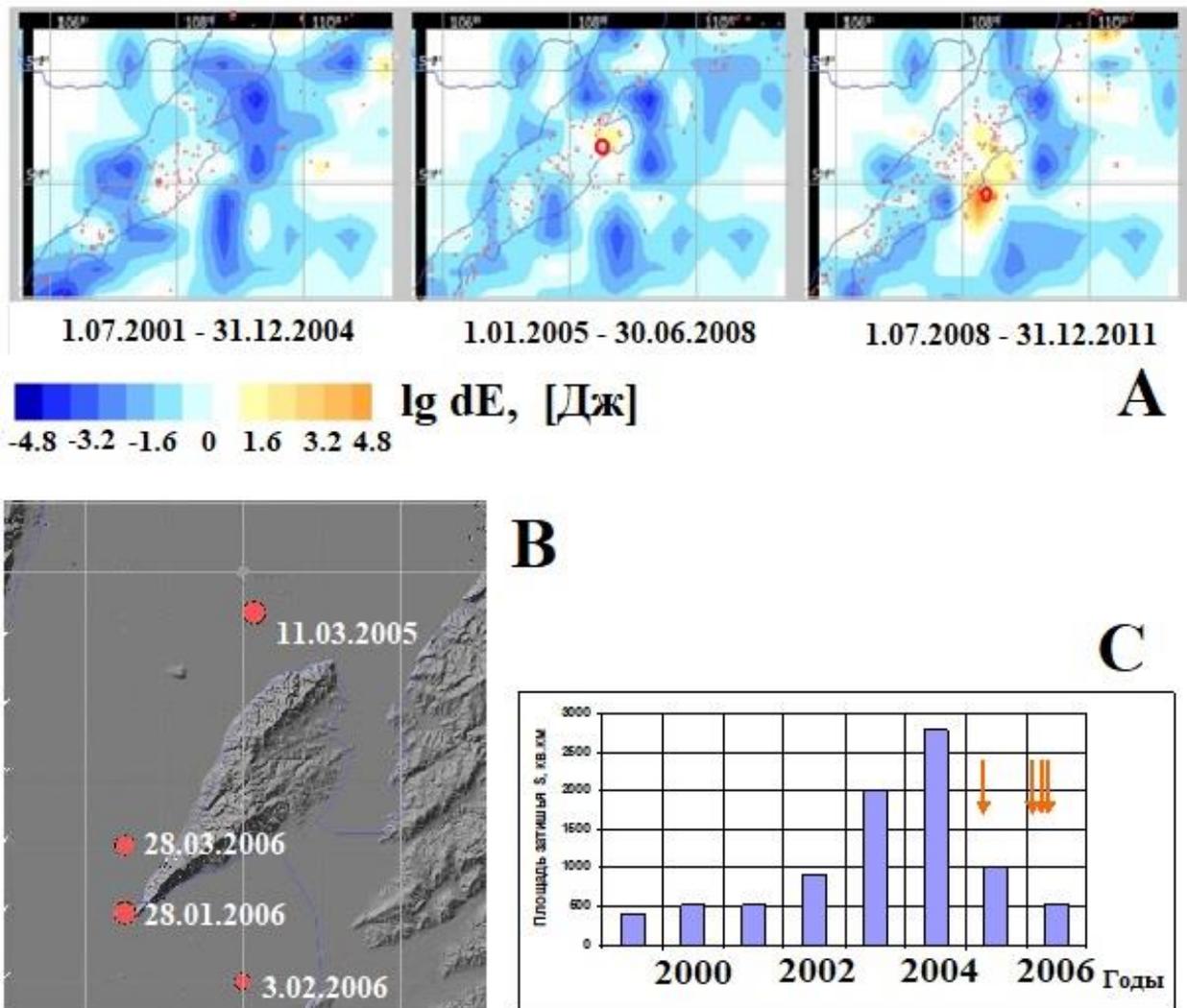


Рис. 3. Аномалии выделения сейсмической энергии в районе Среднего Байкала (А), синие оттенки – дефицит, желто-красные – активизации после 2000 г.; (В) – локальная активизация в районе п-ова Святой Нос в виде серии землетрясений умеренной интенсивности ($M \sim 4 - 4.5$) в 2005-2006 гг.; (С) – изменение во времени площади сейсмического затишья в районе п-ова Святой Нос в 1998–2008 гг.

На рис. 4 представлены результаты определения изменений во времени значений наклона графика повторяемости b для трех участков района Среднего Байкала. Неравномерность распределения во времени этих значений обусловлена недостатком статистически значимого количества сейсмических событий на некоторых временных отрезках. В абсолютном большинстве случаев для определения b -value использовался диапазон магнитуд 1.5–3.5. При этом для построения графика отбирались только те значения, среднеквадратичное отклонение у которых не превышало 0.02. Количество событий, по которому определялось каждое из значений b , составляло, как правило, не менее 100–200.

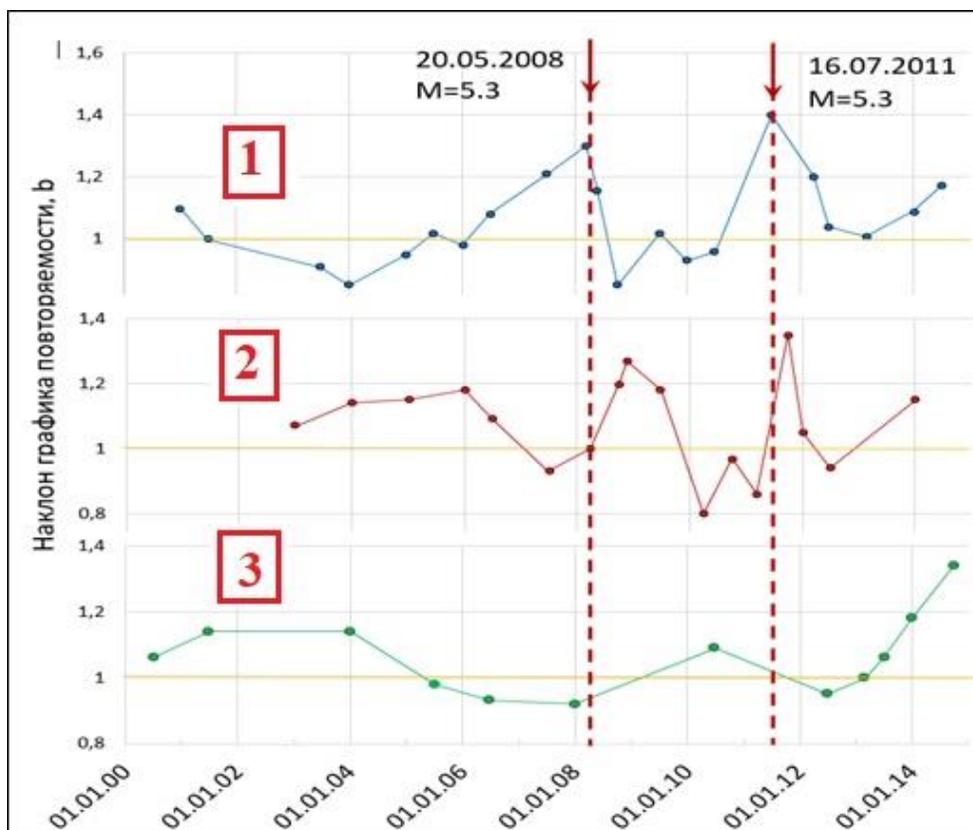


Рис. 4. Изменение наклона графика повторяемости землетрясений b в 2001–2014 гг. для трех участков района Среднего Байкала, показанных на рис. 1

Диапазон изменений значений b -value оказался достаточно широк: от 0.8 до 1.4 при среднеквадратичной погрешности, не превышающей 0.02, что указывает на достоверность полученных значений. Рассмотрим основные характерные особенности поведения параметра b -value за этот период.

Во-первых, на участке 1, в районе п-ва Святой Нос, в период 2001–2004 гг. параметр b -value имеет низкие значения в пределах $\sim 0.85 - 1.00$. Поскольку в этот же период в этом районе имело место сейсмическое затишье (см. рис. 3), это указывает на то, что оно обусловлено консолидацией блоковой среды. Этот результат имеет чрезвычайно важное значение, поскольку о природе сейсмических затиший сведений достаточно мало. Так как на региональном уровне затишье окаймляло всю область будущей активизации 2008–2011 гг. (см. рис. 3), то можно сделать предварительное заключение о том, что в 2001–2004 гг. консолидированные области окружали более разуплотненную область будущей активизации.

Во-вторых, после локальной умеренной активизации (2005–2006 гг.) значения параметра b -value в районе Святого Носа повышаются до значений 1.3 в 2006–2007 гг., что может свидетельствовать о разупрочнении блочной среды. В это же время на участке 2 (район будущего Максимихинского землетрясения) происходит обратный процесс – значения параметра b понижаются вплоть до основного события. Одно из объяснений такого поведения значений b -value – это ослабление консолидированного ансамбля блоков в районе п-ва Святой Нос, во время существования которого район будущего очага находился в условиях разуплотнения и, возможно, более низких значений касательных напряжений. По-видимому, ослабление участка 1 привело к некоторому дополнительному нагружению земной коры участка 2 – района будущего землетрясения. После землетрясения параметр b -value понижается на участке 1 и повышается на участке 2 в эпицентральной области.

Таким образом, наблюдается противоположное по знаку изменение параметра b на соседних участках 1 и 2 с начала 2006 по конец 2008 г.

В 2009 г. в эпицентральной области Максимихинского землетрясения (участок 2) величина параметра b -value вновь понижается до значений 0.80 – 0.95, после чего наблюдается рост параметра b до значений ~ 1.40 как на участке 1, так и на участке 2, возможно связанный со вторым сильным землетрясением рассматриваемой активизации – Туркинским, 16 июля 2011 г., $M=5.3$. Об изменениях параметра b -value на участке 3, расположенном юго-восточнее эпицентральной области Туркинского землетрясения, в период 2008-2012 гг. трудно судить из-за недостаточного количества представительных землетрясений. Однако некоторое повышение активности в этом районе в 2013–2014 гг., позволило получить несколько определений для этого периода, которые указывают на устойчивый рост параметра b -value в эти годы как на этом участке, так и в эпицентральной области Максимихинского землетрясения (участок 2), а также в районе п-ва Святой Нос (участок 1).

ВЫВОДЫ

Наиболее важный результат работы – обнаружение взаимосвязи состояния сейсмогенной блочной среды в эпицентральной области готовящегося сильного землетрясения (Максимихинского) и в соседней области с более жесткой, консолидированной блочной структурой (район п-ва Святой Нос и Баргузинский залив). В этих двух районах наблюдается обратная корреляция значений наклона графика повторяемости землетрясений как перед Максимихинским землетрясением в 2006–2007 гг., так и после него в 2008 г.

Другой важный результат связан с тем, что удалось установить вероятную природу сейсмического затишья, наблюдавшегося в 2001–2004 гг. в районе п-ва Святой Нос и имевшего здесь наибольший дефицит выделения сейсмической энергии. Периоду существования этого затишья соответствуют низкие значения b -value, что указывает на консолидацию блочной структуры в этот период в районе п-ва Святой Нос и Баргузинского залива. На региональном уровне затишье окружало область будущей активизации 2008–2011 гг., поэтому можно сделать предварительный вывод о том, что в 2001–2004 гг. области с консолидированной блочной структурой окружали разупрочненную (ввиду повышенных значений b -value) область будущей активизации.

Таким образом, предложенные методические подходы комплексного анализа параметров сейсмического режима, таких как аномалии выделения сейсмической энергии и наклон графика повторяемости землетрясений, позволили выявить особенности изменений в состоянии сейсмогенной среды при подготовке и реализации сильных землетрясений во время сейсмической активизации 2008–2011 гг. в центральной части Байкальского рифта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 17–05–01234, частичной поддержке Программы IX.128.2 ФНИ и проекта Комплексной программы СО РАН II.1.34. Авторы выражают благодарность Байкальскому и Бурятскому филиалам ФИЦ ЕГС РАН за предоставление данных сейсмологических наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

- Арефьев С.С., Татевосян Р.Э., Шебалин Н.В.** Об устойчивости собственной пространственно-временной структуры сейсмичности Кавказа // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1989. – № 12. – С. 37–41.
- Виноградов С.Д., Пономарев В.С.** Экспериментальное изучение сейсмического режима // Природа. – 1999. – № 3. – С. 77–89.
- Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И.** Максимихинское землетрясение 20 мая 2008 г. с $K_p=14.3$, $M_w=5.3$, $I_0=7$ (Центральный Байкал) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. — Обнинск, 2014. – С. 337–345.
- Гилева Н.А., Мельникова В.И., Середкина А.И., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.** Туркинское землетрясение 16 июля 2011 г. с $K_p=14.5$, $M_w=5.2$, $I_0=7-8$ (Центральное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 300–304.
- Дядьков П.Г., Кузнецова Ю.М.** Аномалии сейсмического режима перед сильными землетрясениями Алтая // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 19–25.
- Дядьков П.Г., Романенко Ю.М., Дучкова А.А., Козлова М.П., Кулешов Д.А., Цибизов Л.В.** О критериях выделения областей подготовки сильных байкальских землетрясений на основе анализа сейсмического режима и результатов тектономагнитного мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 12 (спец. вып. № 36). – С. 11–18.
- Мельникова В.И., Гилева Н.А., Имаев В.С., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.** Особенности сейсмических активизаций Среднего Байкала в 2008–2011 годах // ДАН. – 2013. – Вып. 453, № 6. – С. 680–685.
- Романенко Ю.М., Дядьков П.Г.** Метод выделения сейсмического затишья SEQ (Seismic Energy Quiescence) на примере Кроноцкого землетрясения $M_w = 7.9$ (Камчатка) // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы пятой молодежной тектонофизической школы-семинара (г. Москва, 9–12 октября 2017 г.). – 2017. – С. 327–330.
- Сейсмическая** сотрясаемость территории СССР / Отв. редактор Ю.В. Ризниченко. – М.: Наука, 1979. – 220 с.

Шумилина Л.С. Сейсмическая опасность Камчатки и Командорских островов: диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. – М., 1978. – 213 с.

Dyadkov P.G., Mikheeva A.V. The expert earthquake database (EEDB) for seismic-geodynamic research // Bulletin of the Novosibirsk computing center. Series: Mathematical modeling in geophysics. – 2010. – № 13. – P. 15–30.

Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of earthquakes in California // Bulletin of the Seismological society of America. – 1944. – Vol. 34. – P. 185–188.

Hatzidimitriou P.M., Papadimitriou E.E., Mountrakis D.M., Papazachos B.C. The seismic parameter b of the frequency-magnitude relation and its association with the geological zones in the area of Greece // Tectonophysics. – 1985. – Vol. 120, Is. 1–2. – P. 141–151.

Kuznetsova K.I., Shumilina L.S., Zavyalov A.D. The physical sense of the magnitude-frequency relation // Proc. of the 2nd Intern. Symp. on the analysis of seismicity and on seismic hazard. – Liblice, 1981. – P. 27–46.

Schorlemmer D., Wiemer S., Wyss M. Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes // Nature. – 2005. – Vol. 437(7058). – P. 539–542.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДЯДЬКОВ Петр Георгиевич – кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доцент кафедры геофизики ГГФ НГУ. Область научных интересов: современные геодинамические процессы и процессы подготовки землетрясений на основе анализа параметров сейсмического режима и результатов многолетнего тектономагнитного мониторинга в Байкальском и Алтайском регионах.

РОМАНЕНКО Юлия Михайловна – младший научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Область научных интересов: аномалии выделения сейсмической энергии при подготовке сильных землетрясений. *E-mail: RomanenkoYM@jppgg.sbras.ru.*

КОЗЛОВА Марина Петровна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Область научных интересов: блоковое строение земной коры сейсмоактивных областей и численное моделирование. *E-mail: KozlovaMP@jppgg.sbras.ru.*

ЦИБИЗОВ Леонид Валерьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Область научных интересов: построение моделей земной коры и численное моделирование напряженно-деформированного состояния. *E-mail: TsibizovLV@jppgg.sbras.ru.*

ДУЧКОВА Александра Аглымовна – инженер лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Область научных интересов: анализ изменений во времени параметров сейсмического режима и результатов многолетних стационарных магнитных наблюдений. *E-mail: DuchkovaAA@jppgg.sbras.ru.*