

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ LURR (LOAD-UNLOAD RESPONSE RATIO) НА ПРИМЕРЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОКАЧИ-ОКИ (25.09.2003, $M_w = 8.3$)

А.С. Закупин, А.Ю. Полец

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки, 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;
e-mail: a.zakupin@imgg.ru

Поступила в редакцию 21 июля 2023 г.

В работе представлены результаты ретроспективного и тектонофизического анализа в очаговой области землетрясения Токачи-Оки 25.09.2003, $M_w = 8.3$. Особое внимание уделено тектоническому поясу Хидака, структуры которого задействованы в реализации землетрясения Токачи-Оки. Методика LURR применена на достаточных пространственных (квадрат со стороной около 400 км) и временных (непрерывный 20-летний период) промежутках, чтобы считать результаты достоверными. Получены предвестники для землетрясения Токачи-Оки 25.09.2003 (в среднем за 2 года до события), которые строго определили область прогноза. Результаты МКА совместно с результатами LURR показали этапы развития неустойчивости в зоне Хидака. С 1997 по 2003 гг. (вплоть до землетрясения Токачи-Оки) пояс оконтурился зонами разрушения (преимущественно – горизонтальное сжатие), а вдоль самого пояса за пару лет до землетрясения были обнаружены аномалии LURR. Полученный методом LURR прогноз для землетрясения Токачи-Оки является одним из лучших в нашей практике.

Ключевые слова: землетрясения, прогноз землетрясений, напряженное состояние, зона Хидака.

ВВЕДЕНИЕ

25.09.2003 г. в 19:50 UTC вблизи о. Хоккайдо, Япония, произошло землетрясение с моментной магнитудой $M_w = 8.3$ [55]. Землетрясение вызвало обширные повреждения и оползни. Высота волн цунами достигала 4 метров [27]. Землетрясение в последствии получило название Токачи-Оки.

Как и любое событие такого масштаба, Токачи-Оки упоминается во многих работах, связанных с темой прогноза в прямом или косвенном аспектах. Так, в работах [34, 45] было предсказано землетрясение Токачи-Оки за шесть месяцев до его появления. Для прогноза использовался метод «Reverse Tracing of Precursors» (RTP). Авторы [34, 45] предполагают, что предвестник представляет собой плотную последовательность небольших землетрясений, которые быстро распространяются на большие расстояния, а сильное землетрясение, по их мнению, ожидается в течение девяти месяцев после образования такой цепочки в ее формально определенных окрестностях.

Анализ микросейсмических колебаний в диапазоне периодов в несколько минут, зарегистрирован-

ных перед землетрясением Токачи-Оки, проводился в работе [47]. Была выявлена серия асимметричных импульсов, возникающих за несколько дней до землетрясений. В работе [54] обнаружена ионосферная аномалия на основе вариаций полного электронного содержания, полученного с помощью GPS-измерений. Аномалию зафиксировали за несколько дней до основного события в непосредственной близости от эпицентра. В работе [48], согласно данным, полученным с микробарографов, выявлено изменение атмосферного давления перед землетрясением Токачи-Оки. Изменение давления началось с приходом объемных волн и достигло максимальной амплитуды с приходом поверхностных волн Рэлея, это позволило авторам предположить, что наблюдаемое изменение было вызвано движением грунта от сейсмических волн.

Согласно [38], сильным «неглубоким» землетрясениям вдоль зон субдукции иногда предшествует возникновение сильных глубокофокусных землетрясений. Землетрясению Токачи-Оки 2003 года предшествовала заметная глубинная сейсмичность в субдукционной плите, включая глубокофокусное землетрясение $M_w = 6.8$. Еще одним предвестником, согласно

[39], может считаться изменение во времени параметра фрактальной размерности (D). Данное исследование выявило, что значение параметра D начало снижаться в 1998 г. и стало очень небольшим примерно за год до возникновения главного толчка. По мнению автора, уменьшение значения D перед возникновением главного толчка характерно для некоторых сильных землетрясений, из чего следует, что данное снижение может являться предвестником землетрясения.

В целом обзор работ показывает, что перед землетрясением 2003 года имел место ряд признаков его подготовки по данным различных наблюдений и моделей. Проверка метода LURR в ретроспективном исследовании по сейсмическим данным в районе, где произошло землетрясение Токачи-Оки 2003 года, может явиться хорошим дополнением к ранее полученным результатам. Для усиления тектонофизической стороны исследования в работе предлагается оценить динамику напряженно-деформированного состояния среды на всех этапах эволюции очага (возникновения и развития аномального состояния среды по методу LURR) с помощью метода катакластического анализа (МКА) [20].

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ О. ХОККАЙДО И ПРИРОДА ТЕКТОНИЧЕСКОГО ПОЯСА ХИДАКА

Остров Хоккайдо расположен в активной зоне перехода от Евразийского континента к Тихому океану, в геодинамической зоне стыка трёх литосферных плит: Тихоокеанской, Евразийской (Амурской) и Охотской (рис. 1). Подобное расположение острова определило его тектоническую, сейсмическую и вулканическую активность.

Следует отметить, что современное состояние вопроса о границе между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами весьма дискуссионно [25]. В одних работах на стыке этих плит выделяют Амурскую и Охотскую микроплиты [24], в других эти микроплиты не выделяются [32, 44], при этом Северо-Американская плита показывается по-разному. По Исмаил-Заде и др. [32], Охотская плита входит в состав Северо-Американской плиты, западная граница ее проходит целиком по центру Татарского пролива, а южное окончание захватывает половину о-ва Хоккайдо; по [2], между Амурской и Охотской микроплитами выделяется Японско-Корейский блок, который и должен граничить с Охотским блоком на востоке и с Амурской плитой на западе. Диффузная граница между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами проводится произвольно, и строгого обоснования положения этой границы пока нет.

В пределах северной Японии вопрос о положении границы между Евразийской (Амурской) и Се-



Рис. 1. Возможные границы литосферных плит в северо-восточной части Японии.

I – предложенные Nakamura [40] и Kobayasi [36]; II – граница, предложенная в работе [30], (из работы [33]).

веро-Американской (Охотской) литосферными плитами также неоднозначный. В работе [30] авторы оценили положение границы между плитами вдоль центральной части Хоккайдо (рис. 1, I). Однако в начале 1980-х годов Накамура [40] и Кобаяси [36] предположили, что граница между плитами сместилась в восточную часть Японского моря (рис. 1, II) 1–2 млн лет назад [40] или 0.5 млн лет назад [43].

Вдоль схождения смежных литосферных плит конвергенция обычно осуществляется в широком диапазоне диффузной зоны. Одной из важных характеристик коллизийного процесса является скорость коллизийных деформаций, то есть скорость латерального сокращения земной коры в зоне коллизии. Ее максимальная величина не может превышать тангенциальную компоненту скорости движения океанической плиты, а реальное значение показывает, какая часть общего относительного движения передается на сближение островных дуг и их деформацию в зоне коллизии [10]. Исследования, выполненные в работе [33], показали, что скорость сокращения земной коры

в центральной части Хоккайдо была относительно постоянной начиная с плиоцена, при этом около 50 % схождения (конвергенции) при относительном движении плит, по-прежнему, выполняется в центральной части Хоккайдо (коллизийная зона Хидака) и положение границы между плитами в северной части Японии нельзя обозначить одной линией.

Современная структура о-ва Хоккайдо в основных чертах сформировалась в среднем миоцене при косоугольной коллизии Евразийской и Северо-Американской плит, сопровождавшейся ориентированными с севера на юг сдвиговыми и с востока на запад надвиговыми перемещениями. Как свидетельствует расположение активных разломов и рудных жил, эти движения продолжались в четвертичное время и продолжают в настоящее время [3].

Террейны Хидака и Восточно-Сахалинский в кайнозой были перемещены на значительные расстояния не только в меридиональном, но и в западном направлении по надвигам. Это объясняется расположением о-ва Хоккайдо на стыке правосторонних сдвигов Сахалина и аналогичных сдвигов Курильских островов, вызванных косоугольной субдукцией Тихоокеанской плиты при ее движении в субширотном направлении. Взаимодействие отмеченных систем правосторонних сдвигов вызвало в позднем миоцене формирование коллизийного поднятия хребта Хидака [35]. В результате сформировалась земная кора толщиной до 39 км (зона Хидака) [28]. Правосторонние сдвиговые смещения на Сахалине и Курильских островах в сочетании со сложными перемещениями террейна Осима, вызванного раскрытием Японского моря, очевидно трансформировались в Центральном и Восточном Хоккайдо в надвиги субмеридионального простирания.

По особенностям геологического строения остров Хоккайдо можно разделить на три части: Западную (Японская (Тохоку-Хонсю) островодужная система), Центральную (Хоккайдо-Сахалинское складчатое поднятие, зона столкновения дуга-дуга) и Восточную (Курило-Камчатская островодужная система). Все главные блоковые структуры Хоккайдо ориентированы вкрест простирания желоба и сейсмофокальной зоны. В островных дугах это встречается редко. Аналогом таких соотношений можно считать на Камчатке Камчатский, Кроноцкий, Шипунский полуострова, около которых происходит концентрация землетрясений. В менее четкой форме это же наблюдается и на Хоккайдо.

Зона Хидака – Центральный Хоккайдо – характеризуется наиболее сложным геологическим строением, не принадлежащая по геологическому строению ни к Японской, ни Курильской островным дугам,

охватывает район, расположенный от восточной границы низменности Исикари до тектонической линии Абасири, пересекающей горы Хидака. Образования зоны Хидака характеризуются западной вергентностью складчатых и разрывных нарушений, надвинуты на породные комплексы восточной части донеогеновой Японской вулканической дуги. В структурном отношении в целом пояс Хидака представляется как мощная правосторонняя зона вдоль серии региональных разломов, обусловивших многократное сдвигание разрезов еще до их смятия.

СЕЙСМИЧНОСТЬ О. ХОККАЙДО

Высокая сейсмичность островной глыбы Хоккайдо проявляется в большом количестве мелкофокусных землетрясений в верхних слоях сейсмофокальной зоны. Основная зона сильных землетрясений связана с зоной субдукции Тихоокеанской океанической плиты под Охотскую литосферную плиту. Эпицентры их располагаются на дне океана между глубоководным желобом и восточными берегами острова. Относительно редко происходят землетрясения, эпицентры которых расположены на острове и в Японском море. Сейсмичность острова Хоккайдо не однородна даже вдоль зоны субдукции. Можно выделить две зоны: зону Немуро (продолжение Курило-Камчатской островной дуги) и зону Хидака с учетом ее продолжения под океанским дном [1].

Повышенная сейсмичность, надвиговые смещения, параллельные желобу, и левосторонние сдвиги, наблюдаемые в зоне коллизии Хидака, связаны с поднятием в области передового края Курильской дуги. По данным распределения гипоцентров землетрясений вдоль острова Хоккайдо, угол наклона верхней границы сейсмофокальной зоны изменяется от 20° до 30° со стороны Японской дуги и далее до 40° и 50° к северу вдоль Курильской дуги (143°–144° в.д.). Значительное искривление поверхности сейсмофокальной зоны, как следствие сочленение двух дуг, может быть связано с растяжением или разрывом субдуцирующей плиты с глубиной [12].

Поперечные к сейсмофокальной зоне блоковые структуры влияют на распределение эпицентров землетрясений. Особенно четко это видно на примере горст-антиклинария Китами-Хидака. С ним связаны катастрофические землетрясения с эпицентрами в океане близ берегов Хоккайдо. Это мелкофокусные землетрясения 04.01.1912 г. $M = 8.0$, 4.03.1952 г. $M = 8.3$, 21.03.1982 г. $M = 7.2$.

Землетрясение Токачи-Оки 25 сентября 2003 года, $M_w = 8.3$ продолжило цепочку сильных землетрясений, связанных с зоной Хидака и ее сейсмической активностью. Землетрясение 25 сентября

2003 года сопровождалось большой серией афтершоков. Параметры очага, полученные по данным анализа Р- и S-волн, следующие: сейсмический момент – $1.0 \cdot 10^{21}$ Н·м, сброс напряжений – 50 ТПа, начало разрыва – на глубине 25 км, длительность разрыва – 40 с, максимальный сдвиг – 5.8 м, средний сдвиг – 2.6 м, площадь разрыва составила 90×70 км² [49]. По данным донных сейсмографов, зафиксировано поднятие морского дна на 37 ± 5 см непосредственно в области гипоцентра [46].

Следует отметить, что произошло вспарывание того же участка разлома, что и при землетрясении с $M = 8.3$ в 1952 г. (Очаг землетрясения располагался на шельфе вблизи м. Эримо и имел протяженность 100 км. Интенсивность сотрясений составила 8 баллов). Землетрясения 04.03.1952 г. и 25.09.2003 г. связывают с меганадвигами, возникшими вследствие сегментарного разрыва Тихоокеанской плиты под аккреционной призмой Хоккайдо–Тохоку [41]. Площадь области очага землетрясения Токачи-Оки $\sim 1.4 \cdot 10^4$ км² частично совпадает с областью деформации морского дна (площадью $\sim 2.52 \cdot 10^4$ км²), связанной с землетрясением 1952 г. [49].

Произошла подвижка типа взброс по близвертикальной плоскости северо-восточного простирания (с компонентами левостороннего сдвига) или типа надвиг по пологой плоскости направления восток–северо-восток (с компонентами правостороннего сдвига).

Движение в очаге главного толчка 25.09.2003 г. произошло под превалирующим действием сжимающих напряжений, ориентированных на юго-восток. Тип движения в очаге – надвиг по пологой плоскости направления восток–северо-восток (с компонентами правостороннего сдвига). Очаг землетрясения 25.09.2003 г., согласно имеющимся геолого-тектоническим данным, располагался к юго-востоку от п-ва Эримо на материковом склоне в области трансформной зоны подводного поднятия Хидака, на границе Японского и Курило-Камчатского сегментов глубоководного желоба [9]. Линия разрыва землетрясения Токачи-Оки локализуется на границе между высокоанизотропной средой (горы Хидака) и низкоанизотропной средой (равнина Токачи).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчётов использовались данные о землетрясениях (в том числе решения механизмов очагов для метода МКА) каталога NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster) [56]). Для расчётов по методу LURR с данного каталога были сделаны выборки землетрясений с магнитудами от 3.3 до 5.0 в девяти круговых областях. Среднее ко-

личество землетрясений в каждой рабочей выборке составляло порядка тысячи землетрясений за 20-летний расчётный период. Также на основе данных каталога NIED для исследуемого региона был создан рабочий каталог для расчётов по методу МКА. Каталог насчитывал 362 события с диапазоном магнитуд $3.1 \leq M_w \leq 6.9$ за период времени с 01.01.1997 г. по 25.09.2003 г., глубинный интервал для реконструкции был выбран 0–30 км (глубина центроида GCMT для землетрясения 25.09.2003 г. – $h = 28.2$ км), для расчётов по методу LURR ограничение по глубине не применялось). Наиболее представительные диапазоны магнитуд – от 3.1 до 3.9 (178 событий) и от 4.1 до 4.9 (153 события). Для реконструкции выделены механизмы землетрясений в диапазоне магнитуд $3.1 \leq M_w \leq 5.9$ (исключено 4 события с $M_w \geq 6.0$). Использование в диапазонах магнитуд разницы большей, чем на 2.5–3 ед., приводит к завышению роли сильных землетрясений, так как механизмы этих сильных событий начинают участвовать в определении напряжений большинства доменов, существенно усредняя результаты расчетов [22].

Выполнен анализ рабочего каталога по кинематическому типу фокальных механизмов до землетрясения Токачи-Оки 25.09.2003 г. (362 события) и в афтершоковый период (324 события). Классификация предложена М.И. Стрельцовым [16] и осуществляется по величине углов наклона к горизонту нодальных плоскостей (DP1, DP2) и угла (Pl) оси N: С 01.01.1997 г. по 25.09.2003 г. взбросов – 253 события (70 – процент от числа землетрясений в этой группе), пологих надвигов – 21 событие (6), сбросов – 67 событий (21), взрезов – 4 события (1), сдвигов – 21 событие (6). В период с 26.09.2003 г. по 26.09.2004 г.: взбросов 198 событий (61), пологих надвигов 11 событий (3), сбросов 67 событий (21), взрезов 6 событий (2), сдвигов 42 события (13). Кинематические типы подвижек в очагах сильных землетрясений (12 событий) $M_w \geq 6.0$ (не участвующие в реконструкции) – взбросы и пологие надвиги.

Обработка исходных сейсмологических данных производилась в длиннопериодном (01.01.1997–25.09.2003 гг.) и короткопериодных (1997–1999 гг.; 2000–2001 гг.; 2002–2003 гг.; 2003–2004 гг.) режимах реконструкции МКА в узлах сетки $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ в латеральном направлении. Процедуры формирования однородных выборок механизмов очагов землетрясений выполнены для 188 (1997–1999 гг.); 73 (2000–2001 гг.); 101 (2002–2003 гг.) 439 (1997–2003 гг.); 267 (2003–2004 гг.) квазиоднородных доменов. Для каждого из доменов рассчитаны средние за весь период наблюдений параметры тензора напряжений.

Всего за рассматриваемый временной интервал в исследуемом регионе произошло 12 землетрясений с $M_w \geq 6.0$: 20.02.1997 г. ($M_w = 6.0$, $h = 47$ км), 08.10.1997 г. ($M_w = 6.0$, $h = 8$ км), 15.11.1997 г. ($M_w = 6.0$, $h = 157$ км), 30.05.1998 г. ($M_w = 6.1$, $h = 15$ км), 12.05.1999 г. ($M_w = 6.2$, $h = 96.2$ км), 3.10.2000 г. ($M_w = 6.2$, $h = 15$ км), 13.08.2001 г. ($M_w = 6.4$, $h = 44$ км), 02.12.2001 г. ($M_w = 6.4$, $h = 123.7$ км), 14.10.2002 г. ($M_w = 6.1$, $h = 48$ км), 03.11.2002 г. ($M_w = 6.4$, $h = 44$ км), 26.05.2003 г. ($M_w = 7.0$, $h = 61$ км), 25.07.2003 г. ($M_w = 6.0$, $h = 15$ км).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Метод LURR был разработан китайскими сейсмологами в 90-х годах [50]. При обосновании метода предполагалось, что прогнозным признаком приближения к разрушению сплошной среды в области очага землетрясения является увеличение некоторого параметра, характеризующего различие между нагрузочной кривой $\sigma=f(\epsilon)$ от закона Гука. Авторами [50] подразумевается, что нагрузочная кривая для главного напряжения и главной деформации (одной из компонент этих тензорных величин) может описывать поведение материала среды в области, значительно больших размеров готовящегося очага, под воздействием лунно-солнечных приливов.

Независимо от китайских сейсмологов в работах А.В. Николаева рассматривались также взаимосвязи землетрясений и фаз приливных возмущений [14, 15]. И китайские, и российские работы, в которых несколько отличается методика статистического анализа, дали сходный результат. В методе LURR внимание обращено на различие деформационных откликов среды на разных фазах прилива. Необходимым условием для появления такого различия является нелинейность зависимости $\sigma(\epsilon)$, появление которой связывалось с процессом накопления повреждений

$$\sigma(\epsilon) = E_0 [1 - D(\epsilon)]\epsilon \quad (1)$$

где σ – главное действующее напряжение; ϵ – соответствующая ему компонента деформации, E_0 – модуль упругости; D – мера поврежденности материала, введенная согласно [37]. Параметр D увеличивается с ростом ϵ от 0 до 1, в некоторых работах, например [13], зависимость D от времени увязывается с накоплением микротрещин. Неупругость среды определяет различие изменений деформации $\delta\epsilon_+$, $\delta\epsilon_-$ (плюс и минус определяют направление градиента приливной волны). При увеличении и уменьшении напряжения на одну и ту же величину $\delta\sigma$ рассматриваются абсолютные величины всех изменений. Количественной характеристикой неупругости деформации на данной стадии процесса может служить

отношение деформационных откликов на нагрузку и разгрузку R_ϵ :

$$R_\epsilon = \frac{\delta\epsilon_+ / \delta\sigma}{\delta\epsilon_- / \delta\sigma} = \frac{\delta\epsilon_+}{\delta\epsilon_-} \quad (2)$$

Отношение R_ϵ можно выразить через величины, входящие в выражение (1) с помощью следующей формулы (промежуточные выкладки опущены)

$$R_\epsilon = 1 + \frac{2\sigma}{E_0(1-D)} \frac{dD/d\epsilon}{d\sigma/d\epsilon} \quad (3)$$

В отсутствии накопления дефектов с ростом деформации (или напряжения) производная $dD/d\epsilon = 0$, и $R_\epsilon = 1$. Выражение (3) показывает, что значения R_ϵ могут заметно отличаться от единицы лишь на участке пластического деформирования, когда наклон касательной к графику деформационной кривой существенно уменьшается, и, кроме того, сама деформация $\epsilon = \sigma/[E_0(1-D)]$ конечна. В терминах недавней работы [11] это условие можно перефразировать как снижение эффективной жесткости вмещающей среды. В точке перехода к запредельному деформированию, где $d\sigma/d\epsilon = 0$, выражение для R_ϵ теряет корректность, но разрушение в среде (землетрясение) происходит уже на запредельном участке деформирования. Это предопределяет, что деформационный отклик R_ϵ (признак нарастания пластических деформаций) может быть информативен как среднесрочный предвестник (недели–месяцы), но не краткосрочный предвестник сильного землетрясения (часы–дни).

В работах [50, 51] было предложено рассматривать вместо отношения деформационных откликов R_ϵ параметр LURR Y_m : отношение откликов потока сейсмических событий на тестовую нагрузку и разгрузку. В качестве тестовых изменений напряжения были выбраны лунно-солнечные приливы. Параметр LURR введен для аддитивных величин: сейсмической энергии, деформации Беньоффа и накопления сейсмических событий при помощи следующего соотношения

$$Y_m = \frac{\sum_{i=1}^{N^+} (E_i^m)_+}{\sum_{i=1}^{N^-} (E_i^m)_-} \quad (4)$$

В выражении (4) E_i обозначает сейсмическую энергию события с номером i , которая может быть вычислена по энергетическому классу ($E = 10K$, [17]), который в свою очередь связан с магнитудой ($K = 1.8 M + 4$). Знак «+» означает события, произошедшие в период прироста нагрузки, а знак «-» – события при разгрузке. Показатель степени m принимает значения $m=1, 1/2, 0$. При $m=1$ параметр $Y_1 = Y_E$ представляет собой отношение выделенной

сейсмической энергии в периоды, соответственно, прироста и уменьшения напряжения вследствие приливов. При $m = 1/2$ этот параметр описывает отношение откликов деформации Беньоффа на тех же фазах прилива, $Y_{1/2} = Y_B$. А при $m = 0$ он сводится к отношению количества событий N_+ , N_- , произошедших во время нагрузки и разгрузки соответственно. $Y_0 = Y_N = N_+ = N_-$. Положительными считаются приливные возмущения на той фазе прилива, когда увеличивается напряжение сдвига, действующее вдоль поверхности, по которой, в соответствии с законом Кулона-Мора, легче всего происходит проскальзывание [31]. Стоит отметить, что в работах А.В. Николаева [14, 15] при построении отношения числа событий N_+/N_- в периоды прироста нагрузки и разгрузки эти периоды выбирались несколько иначе: по возмущениям вертикальной компоненты напряжения (добавка к литостатическому давлению соответствует положительной фазе).

Для обработки данных методом LURR используется программный комплекс Seis-ASZ, разработанный в ИМГиГ ДВО РАН [4]. Для проведения расчетов нами разработаны методы, которые отличаются своей универсальностью в выборе параметров обработки, это обеспечивает возможность повторения полученных результатов [6]. В отличие от предыдущих работ наших коллег (например, см. обзор [53]), в которых оценочные параметры изменялись для каждого прогноза (такой подход делает невозможным составление оперативного прогноза), в наших работах они имеют фиксированные значения: диапазон магнитуд в рабочей выборке – от 3.3 до 5.0, величина скользящего окна – 360 дней, тип и размер области для расчета – окружность с радиусом 1° . Используя перечисленные параметры в расчетах с помощью метода LURR, мы выполнили успешные ретроспективные прогнозы землетрясений для различных частей острова Сахалин [5–8].

На первом этапе расчета для эпицентра каждого землетрясения рассчитываются компоненты приливных смещений, формируемых гравитационным потенциалом при взаимодействии системы из трех объектов: Земля-Солнце-Луна. Расчеты приливов проводятся в соответствии с алгоритмом, реализованным в программе Бергера «ERTID» [29]. Компоненты тензора напряжений вычисляются на основе модели жесткой и упругой Земли (с тремя упругими константами). Напряжения рассчитываются в нескольких точках до, во время и после землетрясения таким образом, чтобы определить динамику изменения приливной составляющей. Полученные напряжения используются для расчета критерия разрушения Кулона-Мора и определения динамики эффективного напряжения сдвига.

В результате для каждого землетрясения мы определяем, какую роль сыграли приливные возмущения в момент разрушения (или подвижки) – уменьшили ли они или увеличили эффективное напряжение сдвига. Землетрясения первого типа становятся условно «отрицательными», а землетрясения второго – «положительными». Уравнения механики сплошной среды для приведенных выше расчетов полностью соответствуют тем, которые использовались авторами метода [52], однако этот расчет имеет ряд ограничений. В частности, не в полной мере учитываются особенности механизма очага землетрясения и влияние океанского прилива [23].

На заключительном этапе вычисляется параметр LURR (уравнение 4). Разные исследователи могут иметь разные результаты этого этапа, поскольку они зависят от выбора параметров расчетной модели, включая базовый параметр для уравнения 4 (мы используем деформацию Беньоффа – в уравнении 4 показатель $m = 0.5$). Размер окна для суммирования 360 дней. В расчетный период окно перемещается с шагом в 30 дней. Важно помнить, что точка на графике соответствует середине окна усреднения, то есть фактические данные при расчете используются с опережением на шесть месяцев вперед. Уровень дискриминации (порог для обнаружения аномалий) на графиках распределения параметров LURR установлен равным 3. Превышения порога импульсного характера (превышение в одной точке на шаге в 30 дней) не считаются аномалиями. Такое условие нами принимается при обработке на базе той статистики, которую анализировали ранее, большинство таких всплесков не имело отношения к вопросам прогноза. В [8] определен период тревоги (промежуток времени после появления аномалии, период когда следует ожидать землетрясение). В качестве максимального периода тревоги выбран период в 3 года.

Для изучения напряженного состояния до и после землетрясения Токачи-Оки 25(26).09.2003 г. был использован МКА [18–23, 42].

Основные алгоритмы МКА представлены в монографии [20]. Важной особенностью метода является выделение квазиоднородно деформируемых доменов, в пределах которых формируется однородная выборка механизмов очагов землетрясений. В алгоритме МКА существуют процедуры выделения таких землетрясений, опирающиеся на энергетические принципы теории пластичности (диссипация энергии упругих деформаций на разрывных смещениях).

Подбираемые совокупности землетрясений, удовлетворяющие условию положительности рассеяния упругой энергии, именуются однородными вы-

борками землетрясений. Они служат для определения параметров эллипсоида тензоров напряжений и приращений сейсмотектонических деформаций (главные оси и вид эллипсоида), нормированных на величину интенсивности сдвига, и характеризуют квазиоднородно деформируемый участок земной коры (домен), которому приписываются результаты расчета напряжений.

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния производится в латеральном направлении в узлах сетки. На основании критерия пространственной близости отбираются те землетрясения, области упругой разгрузки которых имеют взаимно пересекающуюся зону, включающую узел расчета. Созданная на основе этого критерия выборка землетрясений называется начальной выборкой механизмов очагов землетрясений. Далее формирование однородных выборок осуществляется путем последовательного перебора по шкале времени событий из начальной выборки. После формирования однородных выборок с достаточным числом событий осуществляется расчет параметров тензоров напряжений и приращений сейсмотектонических напряжений. Каждому узлу расчета может соответствовать несколько однородных выборок механизмов очагов землетрясений. Такой подход позволяет для одного микрообъема выделять несколько фаз квазиоднородного деформирования.

При определении ориентации главных осей тензора напряжений и значений коэффициента Лоде–Надаи осуществляется подбор из всех возможных напряженных состояний такого, для которого совокупность анализируемых механизмов очагов землетрясений доставляет максимум диссипации энергии, накопленной в упругих деформациях [20].

В последние годы крупные достижения при изучении природных напряжений сейсмоактивных областей получены на основе МКА, в качестве которых рассматриваются сколовые трещины или механизмы очагов землетрясений [19–21]. Таким образом, данный метод применим как для оценки параметров современного напряженного состояния по данным о механизмах очагов землетрясений, так и для анализа палеонапряжений, когда для их реконструкции используются данные о зеркалах скольжения, полученные в геологических обнажениях [42].

Одним из направлений практического использования данных о параметрах тектонических напряжений также является сейсморайонирование территории, результаты которого дают возможность разделять участки разломных зон по степени их подготовленности к формированию крупных зем-

летрясений. При этом картина районирования является изменяющейся, требующей постоянного мониторинга тектонической обстановки. Детальность районирования неразрывно связана с масштабным уровнем реконструированного поля напряжений и определяется наиболее представительным диапазоном магнитуд используемого для реконструкции каталога механизмов очагов [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование методом LURR проводилось в режиме сканирования на площади, достаточной для охвата активационного объема, который соответствует уровню изучаемого землетрясения. Для этого эпицентр землетрясения был окружен девятью областями расчёта в пределах зоны с координатами: 40°N–44°N, 142°E–146°E (карта на рис. 2, а). Центры областей размещались через один градус по широте и долготе. Расчётные области радиусом один градус размещены произвольно вне зависимости от эпицентра землетрясения Токачи-Оки. Однако для сравнения (вне режима сканирования) был также проведен расчёт и в круговой области с центром в эпицентре. За 20-летний период было зарегистрировано 1170 землетрясений с $M_w = 3.3–5.0$ (рабочая выборка для расчёта параметра LURR). На рис. 2, б показан график изменения LURR с 2000 по 2020 гг. в расчётной области с центром в эпицентре землетрясения. В расчётной области за 20 лет наблюдается одна аномалия. Превышение порога, равного трём, (на графике деления соответствуют середине окна сглаживания) произошло за 21 месяц до землетрясения Токачи-Оки (декабрь 2001 года).

Рассмотрим результаты в девяти произвольных областях. На рисунке 3(а–и) показаны графики изменения параметра LURR в девяти областях в период с 2000 по 2020 гг. Режим сканирования в ретроспективном исследовании подразумевает гипотетическую возможность сделать прогноз в реальном времени (здесь зоны не соотносятся с эпицентром проверяемого землетрясения). Превышают пороговое значение три аномалии. Точки пересечения порога у аномалий: в июне 2002 г. (рис. 3, б), в декабре 2001 г. (рис. 3, в) и в июле 2017 г. (рис. 3, з). Два превышения импульсного характера (превышение в одной точке на шаг в 30 дней) в области, показанной на рис. 3, в, д, аномалиями не являются по нами ранее установленным правилам (для конкретного шага). В других шести областях аномалий зафиксировано не было. Добавим, что указаны не первые, а вторые точки превышения порога. Это сделано с учётом того, что необходимо выделить возможную импульсную аномалию, равно как и точно определить аномалию реальной, а для этого требуется ещё одна точка.

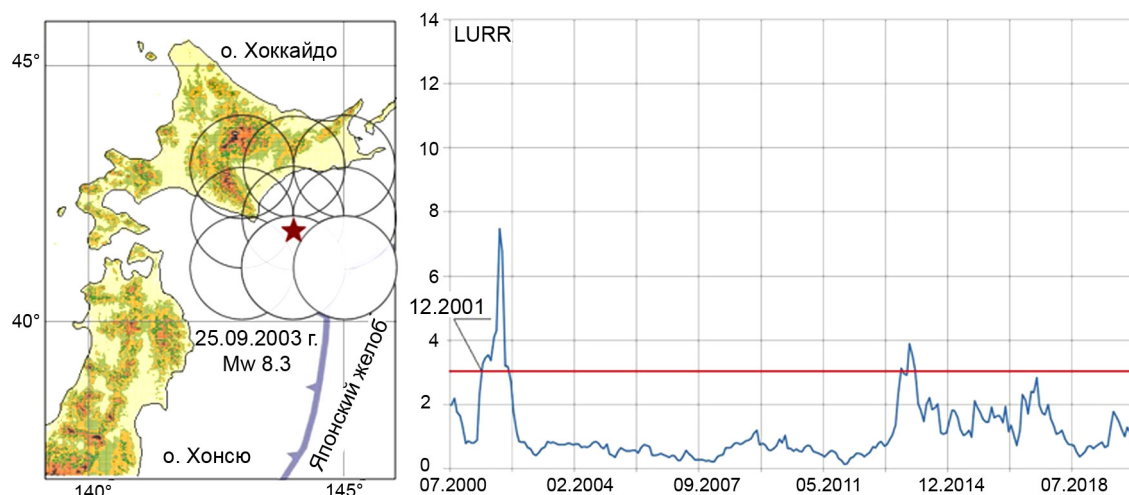


Рис. 2. Девять расчётных областей с выделением из них двух, в которых отмечены предвестники (а); график изменения параметра LURR с 2000 по 2020 гг. для эпицентральной зоны землетрясения Токачи-Оки (б).

По ранее принятой методике аномалии, которые наблюдаются в режиме сканирования в соседних областях и зарегистрированные по времени с разницей не более 6 месяцев (половина окна сглаживания), образуют единую область тревоги со временем ожидания до двух лет [8]. Таким образом, можно заключить, что расчётные области с центрами 41°N , 144°E и 41°N , 145°E являются прогнозной зоной для землетрясения в период с декабря 2001 г. по декабрь 2003 г. Эта зона полностью соответствует пространственно-временным характеристикам землетрясения Токачи-Оки. Первой появилась аномалия на востоке (145°E), а затем область окончательно сформировалась, захватив расчётную зону западнее (144°E).

Кроме землетрясения Токачи-Оки за 20 лет было много других землетрясений. Обычно в подобных исследованиях ставят границу и по магнитуде целевых землетрясений. Для этого в зоне расчёта (зона, включающая все 9 расчётных областей) была проведена декластеризация каталога методом, изложенным в работе [26]. Результат декластеризации показал, что магнитуды ниже шести в качестве целевых на среднесрочных оценках рассматривать нецелесообразно. Например, в диапазоне $M_w = 5.0\text{--}6.0$ осталось 87 землетрясений, и это слишком большое число, чтобы метод LURR мог работать. Землетрясений с магнитудами $M_w > 7.0$ всего три: (26.09.2003, M_w 8.3 (41.778°N , 144.079°E); 29.01.2004, M_w 7.1 (42.946°N , 145.275°E); 11.09.2008, M_w 7.1, (41.776°N , 144.152°E).

Неочевидно, что землетрясение 2004 г. не является афтершоком Токачи-Оки, тем более что его магнитуда указывает на то, что вероятно это про-

должение сейсморазрыва, вызванного основным толчком, в западном направлении, куда простираются ближайшие к эпицентру разломы. Более того, оно произошло спустя год, что также в пользу взаимной зависимости. По факту из трех перечисленных сильных землетрясений остаётся лишь землетрясение 2008 года. Предвестника к этому землетрясению обнаружено не было. Таким образом, при установке нижнего порога прогноза с $M_w = 7.0$ мы получаем неплохой результат с одной ложной тревогой (07.2017 г., 43°N , 144°E), одной пропущенной целью (09.2008 г.) и одним удачным ретроспективным прогнозом для землетрясения Токачи-Оки 25.09.2003 г. На двадцатилетнем промежутке времени с оценкой реализации порядка двух лет – это хороший результат.

Обработка каталога механизмов очагов землетрясений в соответствии с алгоритмом МКА позволила построить карты ориентации главных осей тензора напряжений (рис. 4, 5, 8, а, б), а также районировать кору по виду тензора (эллипсоида) напряжений (рис. 6, 8, в) и геодинамическому режиму (рис. 7, 8, в), определяемому типом напряженного состояния.

На рис. 4, 5, 8, а, б показаны проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений σ_1 (рис. 4, 8, а) и σ_3 (рис. 5, 8, б), до и после землетрясения Токачи-Оки 25(26).09.2003 г. За разные временные интервалы (до землетрясения четыре временных интервала – 1997–1999 гг.; 2000–2001 гг.; 2002–25.09.2003 гг.; 01.01.1997–25.09.2003 гг.; афтершоковый период – 25.09.2003 гг. – 25.09.2004 гг. (рис. 8, а, б)). Ориентации главных осей тензора напряжений в земной коре Японской островной дуги ис-

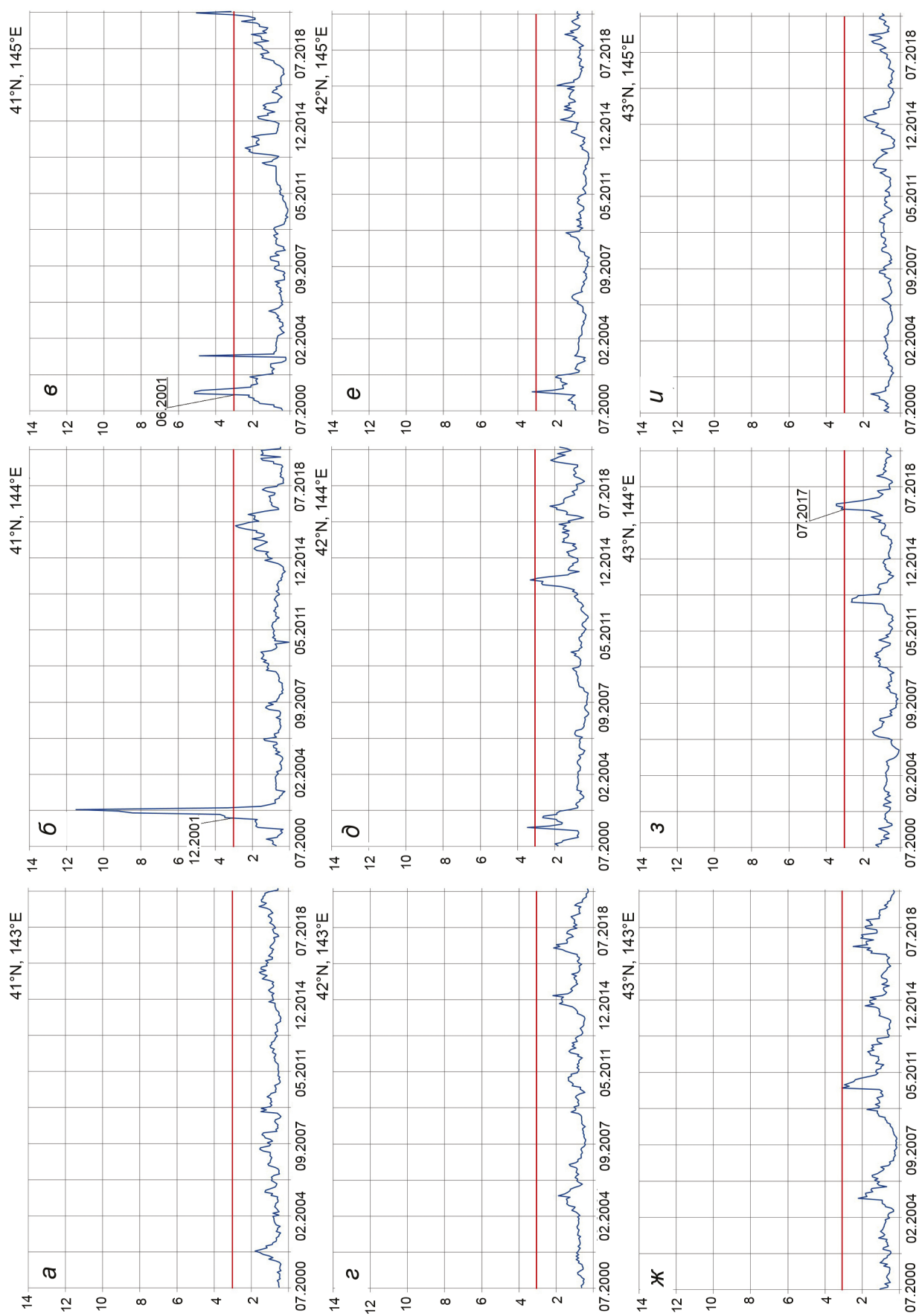


Рис. 3. Результаты для всех расчётных областей. Красной линией показан порог дискриминации для выделения аномалий.

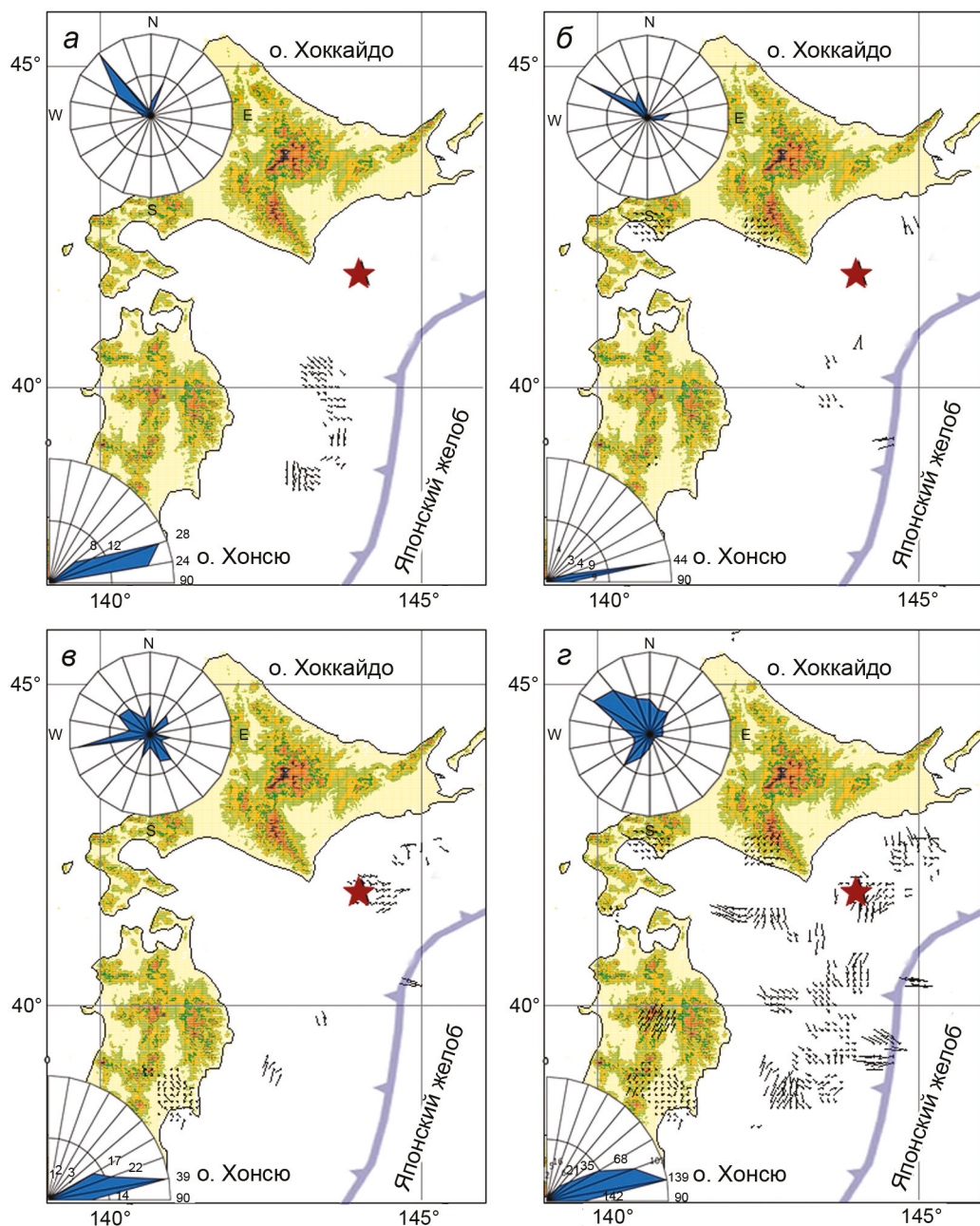


Рис. 4. Ориентация проекций на горизонтальную плоскость осей погружения σ_1 до землетрясения Токачи-Оки 25(26).09.2003 г.

а – 1997–1999 гг., *б* – 2000–2001 гг., *в* – 2002–2003 гг., *г* – 1997–2003 гг.

пытывают ряд изменений (рис. 4, 5), здесь сочетаются два типа напряженного состояния: характерное для зон субдукции океанической литосферы и характерное для континентальной коры. Вблизи оси желоба проекции осей максимального девиаторного растяжения σ_1 и сжатия σ_3 ориентированы практически ортогонально простиранию Японского желоба с погружением, соответственно, под континентальную (оси растяжения) и океаническую (оси сжатия) плиты.

В большей части исследуемой области наблюдается пологая ориентация погружения осей σ_3 , при этом оси максимального девиаторного растяжения σ_1 имеют более крутое погружение с широкой вариацией угла погружения. Ось промежуточного главного напряжения σ_2 направлена вдоль простирания Японского желоба. Такая ориентация осей главных напряжений характерна для субдукционных областей и определяет в качестве активных усилий поддвиговые касательные

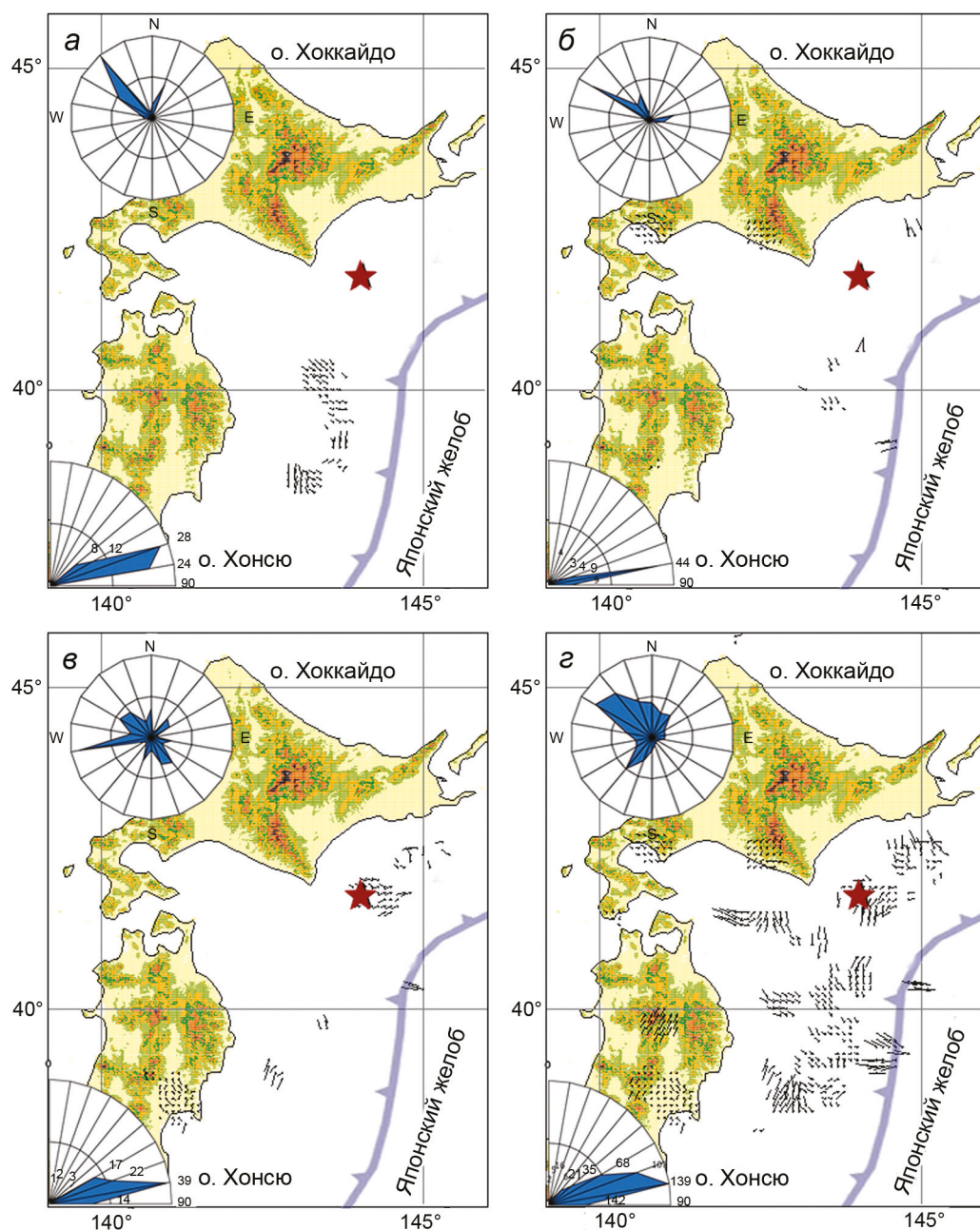


Рис. 5. Ориентация проекций на горизонтальную плоскость осей погружения σ_3 до землетрясения Токачи-Оки 25(26).09.2003 г.

a – 1997–1999 гг., *б* – 2000–2001 гг., *в* – 2002–2003 гг., *г* – 1997–2003 гг.

напряжения, действующие на подошве литосферы. Исключение составляют локальные области, расположенные вблизи о. Хоккайдо и о. Хонсю, где ориентация осей испытывает существенные отклонения.

Тип геодинамического режима и вид тензора напряжений

На основе анализа данных об ориентации осей главных напряжений представлено геодинамическое

районирование исследуемого региона по типу поля напряжений (геодинамический режим), определяющее, в конечном итоге, характер движения вдоль существующей системы разломов. Для определения типа напряженного состояния использовалась схема деления на шесть геодинамических типов, получаемых на основе анализа положения вектора на зенит по отношению к осям главных напряжений [20]. Спектр возможных состояний от горизонтального сжатия

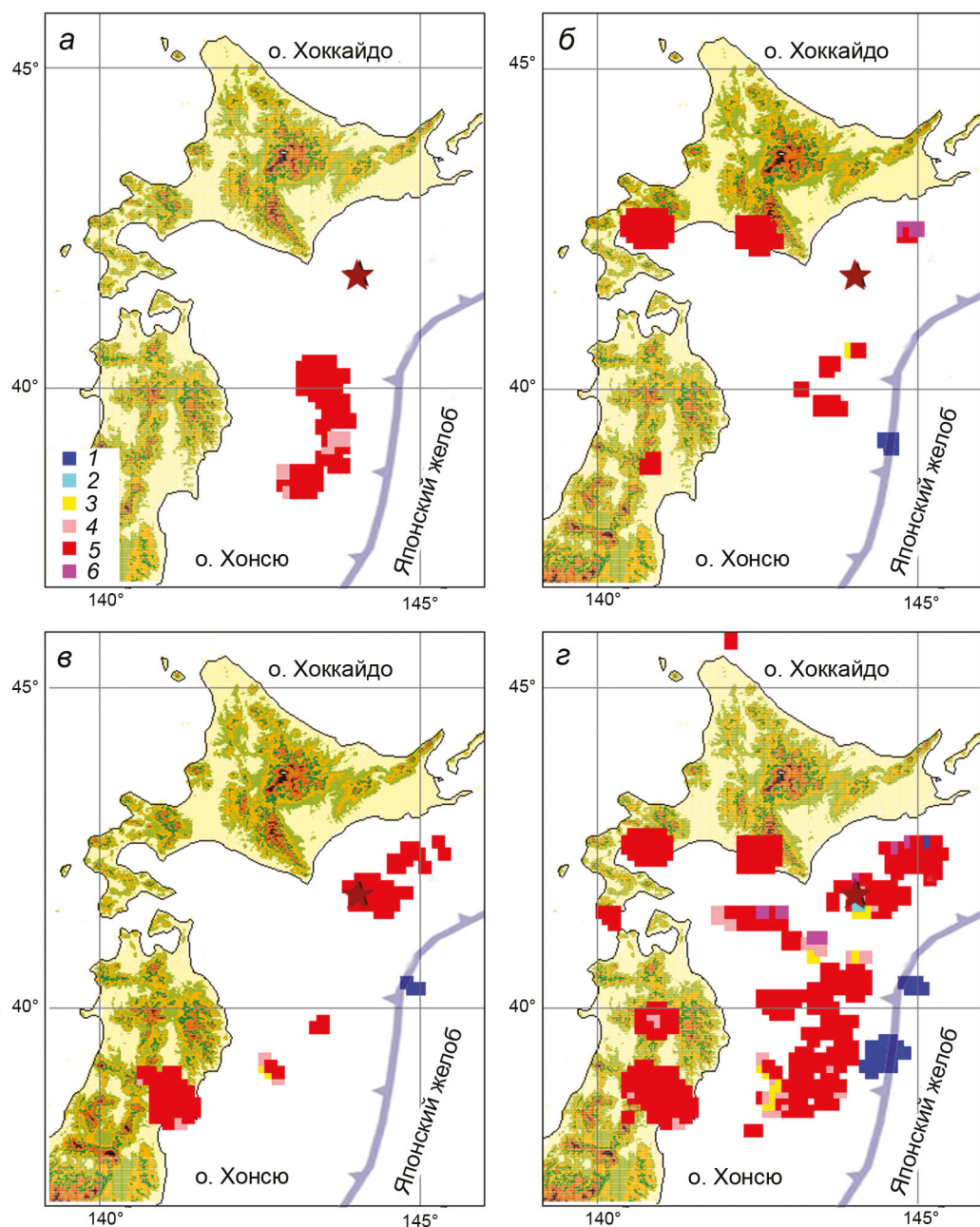


Рис. 6. Тип напряженного состояния до землетрясения Токачи-Оки 25(26).09.2003 г.

1 – растяжение, 2 – растяжение-сдвиг, 3 – сдвиг, 4 – сжатие-сдвиг, 5 – сжатие, 6 – взрез; а – 1997–1999 гг.; б – 2000–2001 гг.; в – 2002–2003 гг.; г – 1997–2003 гг.

(ось σ_1 субвертикальна) и сдвига (ось σ_2 субвертикальна) до растяжения (ось σ_3 субвертикальна).

Преимущественным геодинамическим состоянием исследуемой области для всех временных интервалов является обстановка горизонтального сжатия (рис. 6). В реконструкциях за периоды с 1997 г. по 25.09.2003 г. (рис. 6) и с 25.09.2003 г. по 25.09.2004 г. (рис. 8, в) напряженное состояние более дробное, здесь имеют место практически все наборы напря-

женных состояний. В зоне сопряжения Японской и Южно-Курильской сейсмофокальных областей обстановка горизонтального сжатия сменяется на обстановку горизонтального сдвига в сочетании с горизонтальным растяжением. Обширная область растяжения отмечается вблизи океанического желоба.

После первого этапа рассчитывается также коэффициент Лоде-Надаи (рис. 7), определяющий вид эллипсоида напряжений и, соответственно, вид тензора

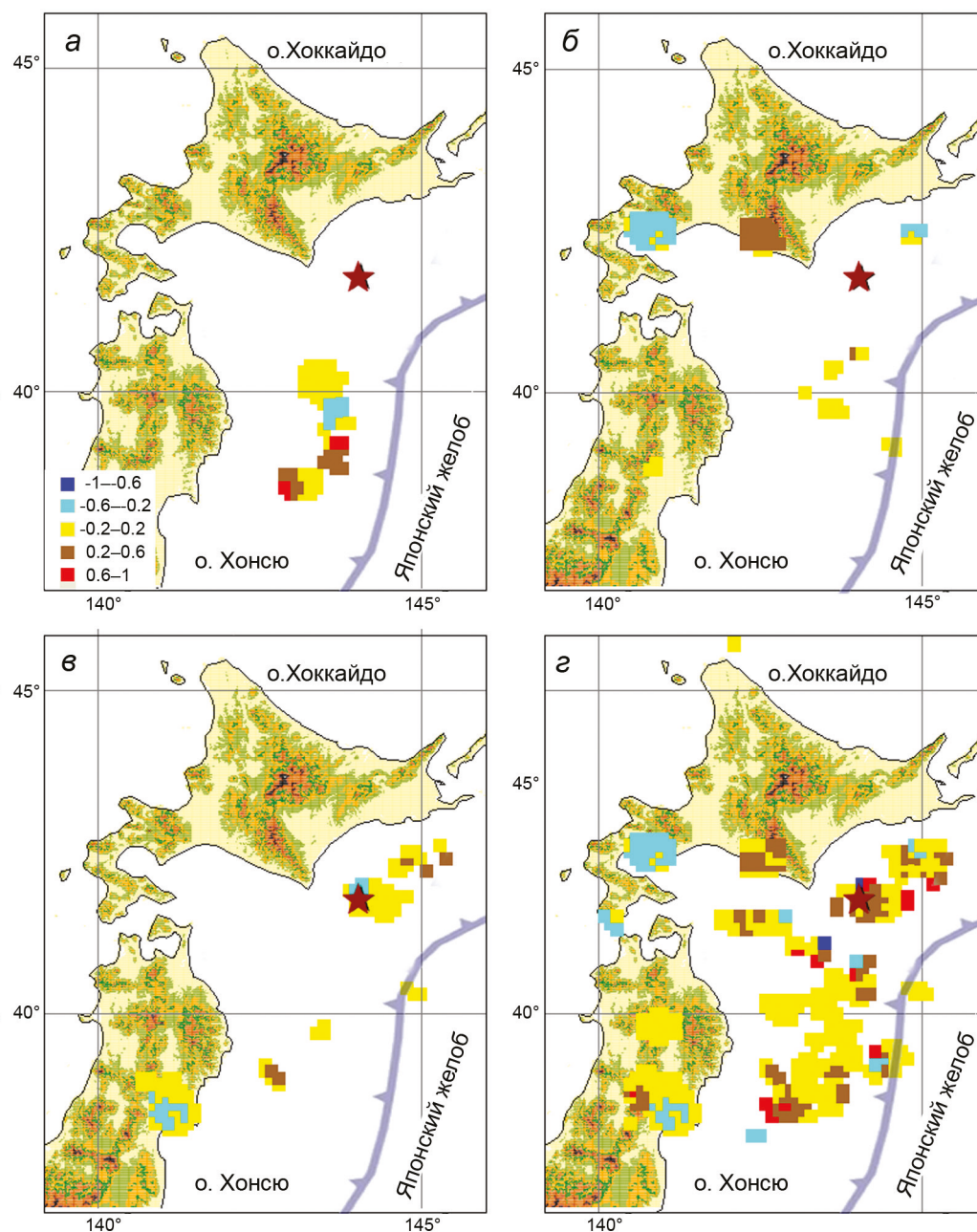


Рис. 7. Вид тензора напряжений – коэффициент Лодэ-Надаи.

a – 1997–1999 гг.; *б* – 2000–2001 гг.; *в* – 2002–2003 гг.; *z* – 1997–2003 гг.

напряжения. Экстремальные значения этого параметра (+1 и -1) соответствуют состояниям одноосного сжатия и растяжения. Значения коэффициента Лодэ-Надаи, близкие к нулю, определяют состояние чистого сдвига, когда промежуточное главное девиаторное напряжение равно нулю, а два других равны по величине, но противоположны по знаку.

Основные типы тензора напряжений исследуемой области до землетрясения Токачи-Оки – чи-

стый сдвиг (вблизи оси Японского желоба) и его сочетания с одноосным сжатием (вблизи о. Хоккайдо) (рис. 7). При этом в земной коре о. Хоккайдо и о. Хонсю отмечены области с напряженным состоянием, близким к одноосному растяжению. Однако после землетрясения в достаточно большом числе доменов реконструкции появились определения, отвечающие тензору вблизи одноосного сжатия (рис. 8, *z*).

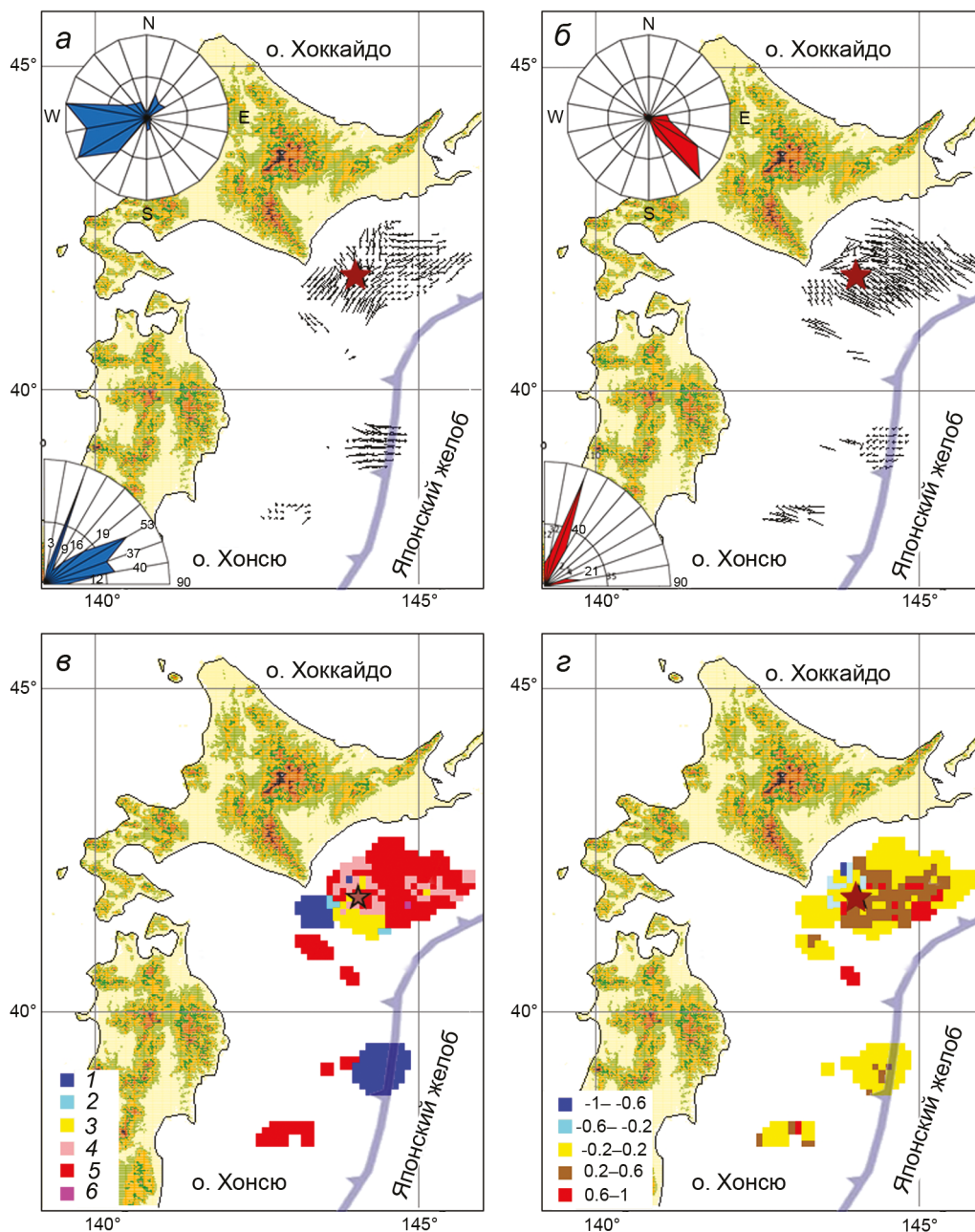


Рис. 8. Реконструкция напряженного состояния в афтершоковый период.

Ориентация проекций на горизонтальную плоскость осей погружения σ_1 (а) и σ_3 (б). Тип напряженного состояния (в): 1 – растяжение, 2 – растяжение-сдвиг, 3 – сдвиг, 4 – сжатие-сдвиг, 5 – сжатие, 6 – взрез. Вид тензора напряжений – коэффициент Лоде-Надаи (г).

ОБСУЖДЕНИЕ

По данным МКА в период с 1997 по 2003 г. (перед землетрясением Токачи-Оки) наблюдалось активное взаимодействие по обоим фронтам от зоны Хидака. С юга блоковые структуры Хидака подвергаются интенсивному сжатию по дуге со стороны Амурской и Тихоокеанской плит, а с севера на границе с зоной Хидака активно взаимодействуют Охотская и Тихо-

океанская литосферные плиты. При этом на юго-востоке в зоне сочленения Курило-Камчатского глубоководного желоба с Японским желобом и далее на юг вдоль Японского желоба наблюдаются области горизонтального растяжения.

Сбросовые подвижки в глубоководных желобах могут происходить из-за различных геологических и геодинамических процессов. Глубоководные желоба примыкают к краям литосферных плит и расположе-

ны на стыке разных структурных блоков, здесь могут возникать пограничные разломные зоны. Накопление напряжений в зоне разлома может привести к подземным сдвигам и перемещению грунта, что в свою очередь может вызвать образование сбросовых подвижек, особенно в областях с нестабильными грунтовыми условиями.

При таком характере взаимодействия в зоне Хидака, которая включает механически ослабленные блоки, вероятно реализация сценария сильного события и движений вдоль пояса с преимущественным положением механизмов сдвига. На это указывает и то, что разрыв сильного землетрясения Токачи-Оки локализовался на границе гор Хидака и равнины Токачи, в области контакта сред с различными реологическими свойствами. Об этом говорят результаты исследований [12], которые показывают зональность распределения анизотропных свойств среды вдоль восточной части острова Хоккайдо и с глубиной, что свидетельствует о различии в характере деформирования среды.

Области под равнинами Токачи и Кусиро характеризуются достаточно устойчивым поведением параметров волн во времени, невысокими коэффициентами анизотропии. Причиной тому может быть ситуация, при которой под равнинами происходит упрочнение механических свойств среды, идёт развитие и аккумуляция сдвиговых деформаций (прерывистого скольжения) в плоскости по падению плиты по типу надвигов (Токачи) и сбросов (Кусиро). Подтверждаются эти соображения результатами МКА в афтершоковый период. Эти результаты показывают, что севернее зоны Хидака реализовался интенсивный процесс разрушения с определяющими зонами сжатия, как и южнее – выделяется небольшая зона сжатия в зоне контакта Хидака с Амурской литосферной плитой. А вот в самом поясе Хидака в северо-западном направлении отмечается зона, где разрушения характеризуются зонами сдвига и растяжения.

Землетрясение Токачи-Оки вызвало сбросовые подвижки, эти подвижки могли быть результатом различных факторов, связанных как с самим землетрясением, так и геологическими условиями. Одним из главных факторов была интенсивная сейсмическая активность, вызванная землетрясением Токачи-Оки. Землетрясение Токачи-Оки с моментной магнитудой 8.3 привело к значительным подземным сдвигам и разломам в земной коре, вызвало нарушение структур и слоев грунта, что стимулировало образование сбросовых подвижек. Другой фактор – это характер грунта и геологические условия. Если грунт имеет нестабильную структуру или содержит большое коли-

чество разрывов и трещин, он может быть подвержен сдвигам и обвалам под воздействием сейсмических сил, особенно при интенсивном землетрясении. Все эти факторы в сочетании создали условия для сбросовых подвижек после землетрясения Токачи-Оки 2003 года.

Интересно, что аномалия LURR, впервые отмеченная в расчётной области с центром 41°N, 145°E в июне 2001 года, находится фактически в месте вклинивания зоны Хидака в Тихоокеанскую плиту. Причём, исходя из распределения сейсмических событий исследуемого региона, на результат, вероятно, оказала влияние лишь западная часть расчётной области. Расчётная область с центром 41°N, 144°E, в которой аномалия фиксируется через 6 месяцев, фактически подхватывает аномалию из соседней области (это возможно математически, так как 6 месяцев это половина скользящего окна) и, возможно, усиливается расчётами землетрясений в её северо-западной части (проверить это нельзя) также вдоль горного пояса Хидака. Вдоль самого пояса сейсмическая активность до землетрясения Токачи-Оки невысокая, и для МКА было недостаточно данных для реконструкции, однако наметившаяся неустойчивость зоны отразилась в аномалиях LURR.

Результаты данной работы показывают метод LURR с новой стороны, в которой раскрываются особенности «чувствительности» методики к зонам с разными условиями деформирования. При этом наши результаты практически лишь подтверждают уже ранее озвученные схемы. Так, в работе [23] рассматриваются теоретические вопросы триггерного влияния земных приливов на инициацию землетрясения в рамках подхода LURR. Показано, что рост кулоновых напряжений, возникающий при этом явлении, происходит не для всех режимов напряженного состояния, действующего в изучаемом регионе.

Земные приливы оказывают избирательное влияние на разломы, и эта избирательность зависит от их кинематического типа разрыва. Для коры, находящейся в разных типах напряженного состояния (горизонтальное сжатие, растяжение или сдвиг), фазой нагружения и разгрузки могут быть разные фазы земных приливов. Возможность триггерного эффекта зависит от кинематического типа сейсмогенных разломов, т.е. от геодинамического типа современного напряженного состояния. Для островных дуг и прибрежных участков континентальной коры кроме прямого фактора влияния земных приливов на деформации в твердой земле имеется еще и косвенный фактор в виде дополнительного давления, вызываемого морскими приливами. Для океанского дна – это дополнительное вертикальное давление, а для коры островных дуг

и прибрежных участков континентов – это боковое давление. Косвенные факторы существенно усложняют эффект воздействия земных приливов на земную кору, в каких-то случаях полностью нивелируя влияние прямого фактора.

Существенно более опасными для реализации триггерного влияния земных приливов являются сбросы и сдвиги, для которых возможно приближение состояния к предельному в моменты их нахождения в фазе поднятия. Для взбросов и сдвигов в фазе прогиба реализация триггерного эффекта менее вероятна, но возможна из-за существенно меньшего приращения кулоновых напряжений. Здесь важно отметить, что для сдвигов, которые могут активизироваться в фазе поднятия или в фазе прогибания от земных приливов, в фазе соответственно прогибания или поднятия происходит уменьшение кулоновых напряжений.

Поскольку наибольшее растяжение действует вдоль меридиана, то наибольшее воздействие будет при субширотном расположении сброса. Соответственно, в области прогиба вдоль меридианов и широт имеет место дополнительное напряжение сжатия, определяющее большую вероятность активизации взбросов. Таким образом, в сейсмогенных зонах земной коры разломы постоянно находятся в предкритическом состоянии и по-разному реагируют на нагрузку и разгрузку. Возникновение сильного землетрясения рассеивает часть накопленной упругой энергии и выводит разлом из критического состояния. Впоследствии тектоническая нагрузка снова приводит разлом в критическое состояние.

ВЫВОДЫ

В работе предлагается оригинальный подход к методологии LURR, который был применен к анализу сейсмичности острова Хоккайдо. Для обработки данных мы использовали программный комплекс Seis-ASZ, разработанный в ИМГиГ ДВО РАН, и авторские методики по определению параметров обработки и расчётных выборок. В частности, это касается определения параметров расчета параметра LURR во времени, правил выявления аномалий LURR, условий сканирования территории, которая во много раз превышает расчетную площадь, и выбора объектов прогноза. Исследование проведено с сейсмическими данными в той части острова Хоккайдо, где в современный период произошло одно из сильнейших землетрясений в мире – Токачи-Оки (25.09.2003, $M_w = 8.3$).

Расчёты показали удовлетворительные результаты по выявлению аномалий LURR перед сильными землетрясениями. Для активной сейсмичности о. Хоккайдо определенно присутствует подавление аномалий перед умеренными землетрясениями, что

в целом положительно сказалось на результате. При большом количестве землетрясений в выборке усреднение окном всегда подавляет помехи (наличие вариаций перед событиями с $M_w = 6.0$ или $M_w = 7.0$ может считаться помехой для выявления аномалии перед сильными землетрясениями). В расчетах таких явных аномалий в определении предвестника перед землетрясением Токачи-Оки нет. В итоге при минимальном уровне ложных тревог (одна) за 20-летний период ретроспективно получен один прогноз, который по всем характеристикам подходит только к самому сильному землетрясению из выборки, то есть к Токачи-Оки.

Впервые в нашей практике результаты анализа по методу LURR сопоставлялись с результатами реконструкции по методу МКА, причём основной задачей являлось выстроить динамику процесса подготовки землетрясения в его финальной части – от появления аномалии LURR до землетрясения. При этом также учитывался период до появления аномалии (временной интервал около 5 лет). Результаты оправдали надежды – несмотря на небольшие периоды (1997–1999 гг.; 2000–2001 гг.; 2002–2003 гг.; 1997–2003 гг.; 2003–2004 гг.) МКА выявил характерные этапы развития неустойчивости в области тектонического пояса Хидака, которая полностью соответствует геологическим и тектоническим представлениям об этой территории. Более того, аномалии LURR, которые появились на завершающем этапе (когда основные области сжатия вдоль пояса были отработаны), определяют структуры тектонического пояса Хидака как зону будущей катастрофы от места вклинивания пояса в Тихоокеанскую плиту с перемещением предвестника во времени на северо-запад вдоль пояса. В дальнейшем представляет интерес развивать кооперацию двух методов (LURR и МКА).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апродов В.А. Природа мира. Зоны землетрясений. М.: Мысль, 2000. 620 с.
2. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В. Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // Геотектоника. 2004. № 1. С. 3–20.
3. Гранник В.М. Геология и геодинамика южной части Охотоморского региона в мезозое и кайнозое: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. Владивосток, 2006. 37 с.
4. Закупин А.С. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса // Геоинформатика. 2016. № 1. С. 34–43.
5. Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Оморского землетрясения на Сахалине ($M_w = 5.8$, 14 августа 2016 года) // Геология и геофизика. 2018. Т. 11. С. 1904–1911. <https://doi.org/10.15372/gig20181112>
6. Закупин А.С., Богинская Н.В. Среднесрочные оценки сей-

- смической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты // Геосистемы переходных зон. 2020. Т. 4, № 2. С. 160–177.
<https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.160-168.169-177>
7. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. Последовательное применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине // Геофизические процессы и биосфера. 2020. № 1. С. 66–78. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4>
 8. Закупин А.С., Богинская Н.В. Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5, № 1. С. 27–45. <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.1.027-045>
 9. Карта разломов территории СССР и сопредельных стран. 1:2 500 000 / Под ред. А.В. Сидоренко. М.: Мингео и АН СССР, 1980.
 10. Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В., Зеленин Е.А., Михайлюкова П.Г. Скорость коллизионных деформаций камчатского полуострова (Камчатка) // Геотектоника. 2014. № 2. С. 42–60.
 11. Кочарян Г.Г., Батухтин И.В. Лабораторные исследования процесса скольжения по разлому как физическая основа нового подхода к краткосрочному прогнозу землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 3. С. 671–691. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0367>.
 12. Лунёва М.Н. Сейсмическая анизотропия и пространственное распределение параметров расщепления волн от местных землетрясений вдоль восточной части острова Хоккайдо // Физическая мезомеханика. Т. 11, № 1. 2008. С. 37–43.
 13. Макаров П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11, № 3. С. 19–35.
 14. Николаев В.А. Пространственно-временные особенности связи сильных землетрясений с приливными фазами // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. С. 103–114.
 15. Николаев В.А. Реакция сильных землетрясений на фазы земных приливов // Физика Земли. 1994. № 11. С. 49–58.
 16. Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Бойчук А.Н., Миталева Н.А., Оскорбин Л.С., Рудик М.И., Стрельцов М.И., Тихонов И.Н., Малышев А.И. / Симушское землетрясение 9 января 1989 года. Препр. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1991. 54 с.
 17. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. М.: Изд-во АН СССР. 1960. № 176. С. 75–114.
 18. Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Докл. АН. 2003. Т. 388, № 2. С. 237–243.
 19. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Лунина О.В., Дзюба И.А. Приложение метода катакластического анализа сколов к реконструкции палеонапряжений: Труды тектонического совещания, Академгородок, г. Новосибирск, 1–5 февраля 2004 г. Новосибирск, 2004. С. 103–106.
 20. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Наука, 2007. 406 с.
 21. Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саян // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 2. С. 271–291.
 22. Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. Т. 5, № 3. С. 469–506.
 23. Ребецкий Ю.Л. К теории детерминированного прогноза землетрясений методом LURR // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5, № 3. С. 192–222.
<https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.3.192-208.208-222>
 24. Савостин Л.А., Вержбицкая А.И., Баранов Б.В. Современная тектоника Охотоморского региона // Докл. АН СССР. 1982. Т. 266, № 4. С. 961–965.
 25. Сим Л.А., Брянцева Г.В., Саввичев П.А., Каменев П.А. Особенности переходной зоны между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами (на примере напряженного состояния о-ва Сахалин) // Геосистемы переходных зон. 2017. № 1. С. 3–22.
 26. Смирнов В.Б. Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 93–105.
 27. Старовойт О.Е., Михайлова Р.С., Рогожин Е.А., Чепкунас Л.С. Северная Евразия // Землетрясения Северной Евразии. 2009. Т. 12. С. 11–28.
 28. Эрлих Э. Н. Современная структура и четвертичный вулканизм западной части тихоокеанского кольца. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 1979. 210 с.
 29. Berger J., Farrell W., Harrison J.C., Levine J., Agnew D.C. ERTID 1: A program for calculation of solid Earth tides. Publication of the Scripps Institution of Oceanography. 1987.
 30. Chapman M.E., Solomon S.C. North American–Eurasian plate boundary in Northeast Asia // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 921–930.
 31. Harris R.A. Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implication for seismic hazard // J. Geophysical Research. 1998. V. 103. P. 24347–24358.
 32. Ismail-Zadeh A., Satoru Honda, Tsepelev I. Linking mantle upwelling with the lithosphere decent and the Japan Sea evolution: a hypothesis // Sci. Rep. 2013. V. 3. 1137. DOI:10.1038/srep01137.
 33. Kato N., Sato H., Orito M., Hirakawa K., Ikeda Y., Ito T. Has the plate boundary shifted from central Hokkaido to the eastern part of the Sea of Japan? // Tectonophysics. 2004. V. 388. P. 75–84.
 34. Keilis-Borok V., Shebalin P., Gabrielov A. Reverse tracing of short-term earthquake precursors Turcotte // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2004. V. 145. P. 75–85.
 35. Kimura G., Miyashita S., Miyasaka S. Collision tectonics in Hokkaido and Sakhalin in Accretion Tectonics in the Circum Pacific Regions, edited by M. Hashimoto and S. Uyeda. Terrapub, Tokyo. 1983. P. 117–128.
 36. Kobayasi Y. Initiation of subduction of a plate // Earth Monit. 1983. V. 5. P. 510–514. (in Japanese).
 37. Lamaitre J. Formulation and identification of damage kinetic constitutive equations. In continuum Damage Mechanics (ed. Krajcinovic D.) // Springer-Verlag Wien. 1987. P. 37–90.
 38. Mogi K. Deep seismic activities preceding the three large ‘shallow’ earthquakes off south-east Hokkaido, Japan – the 2003 Tokachi-oki earthquake, the 1993 Kushiro-oki earthquake and the 1952 Tokachi-oki earthquake // Earth Planets Space. 2004. 56. P. 353–357.
 39. Murase K. A Characteristic Change in Fractal Dimension Prior to the 2003 Tokachi-oki Earthquake (MJ = 8.0), Hokkaido,

- Northern Japan // *Earth Planets Space*. 2004. V. 56. P. 401–405.
40. Nakamura K. Possibility of a nascent plate boundary at the eastern margin of the Japan Sea // *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*. 1983. V. 58. 711–722. (in Japanese)
 41. Preliminary observations on the Tokachi-Oki, Japan, Earthquake of Sept. 26, 2003 // *EERI Newslett.* 2003. V. 37, N 12. P. 1–4.
 42. Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Kuchay O.A., Tatevossian R.E. Development of inversion methods on fault slip data. Stress state in orogenes of the central Asia // *Tectonophysics*. 2012. V. 581. P. 114–131.
 43. Seno T. New plate boundary around Japan and its change after 0.5 Ma // *Kagaku (Science)*. 1987. V. 57 P. 84–93 (in Japanese).
 44. Seno T., Sakurai T., Stein S. Can the Okhotsk plate be discriminated from the North American plate // *J. Geophys.* 1996. V. 101, B5. P. 11305–11315.
 45. Shebalin P., Keilis-Borok V., Zaliapin I., Uyeda S., Nagao T., Tsybin N. Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, M = 8.1 A case history // *Earth Planets Space*, 2004. V. 56. P. 715–724.
 46. Shiobara H., Shimizu H. Success in direct observation of off-Tokachi earthquake: JAMSTEC // *S and T Today*. 2003. V. 15, N 12. P. 6.
 47. Sobolev G. A. Series of Asymmetric Pulses in the Low-Frequency Range (Periods of 1–300 min) of Microseisms as Indicators of a Metastable State in Seismically Active Zones // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2008. V. 44, N 4. P. 261–274.
 48. Watada S., Kunugi T., Hirata K., Sugioka H., Nishida K., Sekiguchi S., Oikawa J., Tsuji Y., Kanamori H. Atmospheric pressure change associated with the 2003 Tokachi-Oki earthquake // *Geophysical research letters*. 2006. V. 33, L24306. doi:10.1029/2006GL027967
 49. Yamanaka Y., Kikuchi M. Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves // *Earth, Planets and Space*. 2003. V. 55, N. 12. P. 21–24
 50. Yin X., Yin C. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction // *Science in China*. 1991. V. 34. P. 977–986.
 51. Yin X.C., Yin C., Chen X.Z. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction – The load-unload response ratio theory. Nonlinear dynamics and predictability of geophysical phenomena // *Geoph. Monograph*. 1994. V. 18. P. 55–60.
 52. Yin X.C. Chen X. Zh., Song Zh.P. Yin C. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory // *Pure Appl. Geophys.* 1995. 145(3–4). P. 701–715. <https://doi.org/10.1007/bf00879596>.
 53. Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang, Y. Zhang, Y., Peng K., Wang H., Song, Z., Yu H. Zhuang J. LURR's twenty years and its perspective // *Pure Appl. Geophys.* 2006. V. 163. P. 2317–2341. <https://DOI.10.1007/s00024-006-0135-x>.
 54. Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I., Krankowski A., Lagovsky A.F. Precursory phenomena observed in the total electron content measurements before great Hokkaido earthquake of September 25, 2003 (M = 8.3) // *Stud. Geophys. Geod.* 2007. V. 51. 267–278.
 55. <https://www.globalcmt.org/>
 56. <http://www.fnet.bosai.go.jp/>

Рекомендована к печати В.Г. Быковым

после доработки 04.02.2024 г.

принята к печати 14.03.2024 г.

A.S. Zakupin, A.Yu. Polets

Tectonophysical features of the load-unload response ratio (LURR) caused by the Tokachi-Oki earthquake (September 25, 2003, Mw = 8.3)

The paper presents the results of retrospective and tectonophysical analysis in the source area of the September 25, 2003 Mw = 8.3 Tokachi-Oki earthquake. Particular attention is paid to the Hidaka tectonic belt, the structures of which are involved in the Tokachi-Oki earthquake. The load-unload response ratio (LURR) method was applied at sufficient spatial (a square with a side of about 400 km) and temporal (continuous 20-year period) intervals to consider the results reliable. The harbingers for the Tokachi-Oki earthquake were obtained (2 years on average before the event), which strictly determined the earthquake location. Findings of the characterization of weak cataclastic fault rocks together with LURR results showed the stages of instability development in the Hidaka collision zone. The Hidaka tectonic belt was delineated by destruction zones (mainly horizontal compression) from 1997 to 2003 (up to the Tokachi-Oki earthquake). The LURR anomalies were detected along the belt a couple of years before the earthquake. The Tokachi-Oki earthquake prediction by the LURR method is one of the best in our practice.

Key words: earthquakes, earthquake prediction, stress state, Hidaka zone.