

УДК 551.248(571.56)

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ АКТИВНЫХ СЕГМЕНТОВ ЗОНЫ СОПРЯЖЕНИЯ КОЛЫМО-ОМОЛОНСКОГО СУПЕРТЕРРЕЙНА И ЮЖНО-АНЮЙСКОЙ СУТУРЫ, СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ

© 2021 г. Л. П. Имаева^{1, 2, *}, В. С. Имаев^{1, 2}, А. И. Середкина^{1, 3}

¹Институт земной коры СО РАН, д. 128 ул. Лермонтова, 664033 Иркутск, Россия

²Академия Наук Республики Саха (Якутия), д. 33 просп. Ленина, 677007 Якутск, Россия

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, д. 4 Калужское шоссе, 108840 Московская обл., Троицк, Россия

*e-mail: imaeva@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 05.08.2020 г.

После доработки 14.10.2020 г.

Принята к публикации 29.10.2020 г.

Выполнен комплекс сейсмоструктурных исследований, направленный на выявление признаков реактивации граничных шовных зон и определение параметров напряженно-деформированного состояния земной коры активных сегментов зоны сопряжения Колымо-Омолонского супертеррейна и Южно-Анюйской сутуры. Используются данные по средним тензорам сейсмоструктурных деформаций, рассчитанные для основных эпицентральных полей территории северо-востока России. Нами получены новые данные по очаговым характеристикам землетрясений умеренных магнитуд, которые позволили уточнить определение кинематического типа сопряжения шовных зон граничных тектонических структур, образовавшихся вдоль арктической и тихоокеанской континентальных окраин. Выявлены режимы сейсмоструктурной деструкции земной коры, на которые оказывают влияние как глобальные геодинамические процессы, происходящие на границах литосферных плит, так и доминирующие типы деформационных полей смежных тектонических структур. Результаты сейсмоструктурного анализа свидетельствуют об активизации шовных зон северо-западного фланга Колымо-Омолонского супертеррейна, происходящей в обстановке устойчивого северо-восточного сжатия и возможном их продолжении в акваторию моря Лаптевых, где они сочленяются со структурными элементами Южно-Анюйской сутуры (Новосибирский сегмент). В Чукотском сегменте сутуры фиксируется изменение режима сейсмоструктурной деструкции земной коры от сжатия к растяжению, которое связано с наложением деформационных полей активных зон сопряженных тектонических структур Новосибирско-Чукотской и Корякско-Камчатской покровно-складчатых областей. Для территории Арктического сектора Северо-Востока России сформирована база данных, отражающая параметры сейсмоструктурных деформаций земной коры, которая может быть использована при различных геодинамических реконструкциях.

Ключевые слова: Колымо-Омолонский супертеррейн, Южно-Анюйская сутура, шовные зоны, фокальные механизмы очагов землетрясений, тензоры сейсмоструктурных деформаций, параметры напряженно-деформированного состояния земной коры

DOI: 10.31857/S0016853X21010069

ВВЕДЕНИЕ

В исследовании многих аспектов современной геодинамики Арктического сектора северо-востока России, несмотря на прогресс, остается ряд нерешенных проблем, связанных с определением типов напряженно-деформированного состояния земной коры основных тектонических элементов, которые являются основой для разработки динамической модели эволюции новейших структур данного региона [2, 3, 7, 11, 20, 28, 33, 34, 38]. Сейсмоструктурный анализ, включающий элементы геолого-геофизических пара-

метров неотектонических структур и сейсмичности, проведен для активных сегментов зоны сопряжения Колымо-Омолонского супертеррейна и Южно-Анюйской сутуры, а также контактных тектонических структур Новосибирско-Чукотской и Корякско-Камчатской покровно-складчатых областей.

Основой наших исследований являлся комплексный подход в решении задач сейсмоструктурного анализа в зонах сейсмогенерирующих структур с различным типом геодинамического режима, направленный на выявление признаков

реактивизации граничных шовных зон северо-западного фланга Колымо-Омолонского супертеррейна, а также северо-западного и восточного флангов возможного продолжения структурных элементов Южно-Анюйской сутуры. Наше исследование базируется на структурно-геометрическом изучении деформаций в зонах динамического влияния активных разломов с определенным типом напряженного состояния земной коры. Составными частями исследования являются проведение детальных работ по установлению структурных парагенезисов активных разломов и изучение структурно-тектонической позиции основных эпицентральных полей с применением тектонофизического, палеосейсмологического и неотектонического анализов.

С целью определения доминирующих режимов сейсмотектонической деструкции земной коры дополнительно были использованы данные, полученные по средним тензорам сейсмотектонических деформаций, ориентация главных осей которых позволила выявить закономерность смены тектонических режимов вдоль граничных структурных швов основных тектонических элементов [20, 38]. К сейсмотектоническому анализу были привлечены новые данные по очаговому характеристикам землетрясений умеренных магнитуд, которые были зарегистрированы за пределами областей однородного деформирования земной коры. Проведенный алгоритм исследований позволил дифференцированно обозначить зоны повышенной сейсмической активности и структурно выделить активные сегменты зоны сопряжения Колымо-Омолонского супертеррейна и Южно-Анюйской сутуры, которые отличаются параметрами напряженно-деформированного состояния земной коры. В статье также приведен анализ структурно-тектонических, геолого-геофизических и сейсмологических данных, построены дополнительные схемы, отражающие общий сейсмотектонический план активных сегментов анализируемых структур.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Тектонические структуры северо-западного фланга Колымо-Омолонского супертеррейна

Колымо-Омолонский супертеррейн занимает обособленное положение в составе мезозойских структур Верхояно-Чукотской покровно-складчатой области и представляет собой комплекс террейнов, которые различны по геодинамической природе, строению, вещественному составу и истории геологического развития (рис. 1). Большинство террейнов в среднеюрское время были амальгамированы в одну, более крупную, тектоническую единицу — Колымо-Омолонский супертеррейн который, как единый блок, причле-

нился к Сибирскому континенту в конце поздней юры—начале мела [2, 16, 17, 23].

Тектонические структуры северо-западной зоны Колымо-Омолонского супертеррейна отделены от Верхоянского складчато-надвигового пояса системой шовных зон различного ранга, представляющих собой ряд активизированных надвигов и взбросов, смещающихся прямолинейными поперечными сдвигами (см. рис. 1). На кинематический тип движений в рассматриваемой разломной системе указывают геолого-структурные данные и параметры сейсмодислокаций, выявленных в Адыча-Тарынской шовной зоне [20, 38]. В среднем течении р. Адыча установлены надвиги триасовых пород на среднеплейстоценовые и среднечетвертичные толщи. По морфологии это пологие (30° – 40°) разрывы, выполненные пертертными, развальцованными породами с тектонической глиной. В устье р. Чаркы в высокой террасе р. Адыча установлен надвиг триаса на средний плейстоцен, а в верховьях р. Адыча установлен взброс, по которому триасовые породы перекрывают миоценовую россыпь. Плоскости всех отмеченных надвигов и взбросов падают на северо-восток под горную систему хребта Черского.

На северо-западном фланге супертеррейна левосдвиговая система активных разломов, трассируемая с сейсмотектонической зоны Черского, сопряжена со структурами деформационных зон Полоусно-Дебинского террейна, которые представлены серией субпараллельных надвигов и взбросов с падением плоскостей на юг и юго-запад, а также характеризуется взбросо-сдвиговыми и сдвиговыми перемещениями (рис. 2). Для отдельных разрывов установлены существенные горизонтальные перемещения, амплитуда которых достигает 12–20 км [16, 17]. На границе с блоком Андрей-Тас кайнозойские образования Индигиро-Зырянского прогиба интенсивно дислоцированы в складки и надвиговые разрывы [9, 10, 20]. Так в бассейне р. Сисиктях эоценовые складки достигают крутых углов падения (75° – 85°) с общим направлением падения толщи на северо-восток (азимут падения 35° – 55°). В обнажении дополнительно фиксируются небольшие складки с горизонтальными шарнирами (азимут простирания 330°). Они усложняют региональное моноклиальное падение толщи и указывают на то, что все эти породы были смяты продолжающейся наложенной деформацией в направлении с юго-запада на северо-восток (со стороны блока Андрей-Тас). Таким образом, анализ кинематических особенностей активных разломов и типов позднекайнозойских складчатых и разрывных деформаций показал, что на северо-западном фланге Колымо-Омолонского супертеррейна развиты дизъюнктивы различного ранга и генезиса, большинство из них сформированы в условиях устойчивого горизонтального сжатия (см. рис. 1).

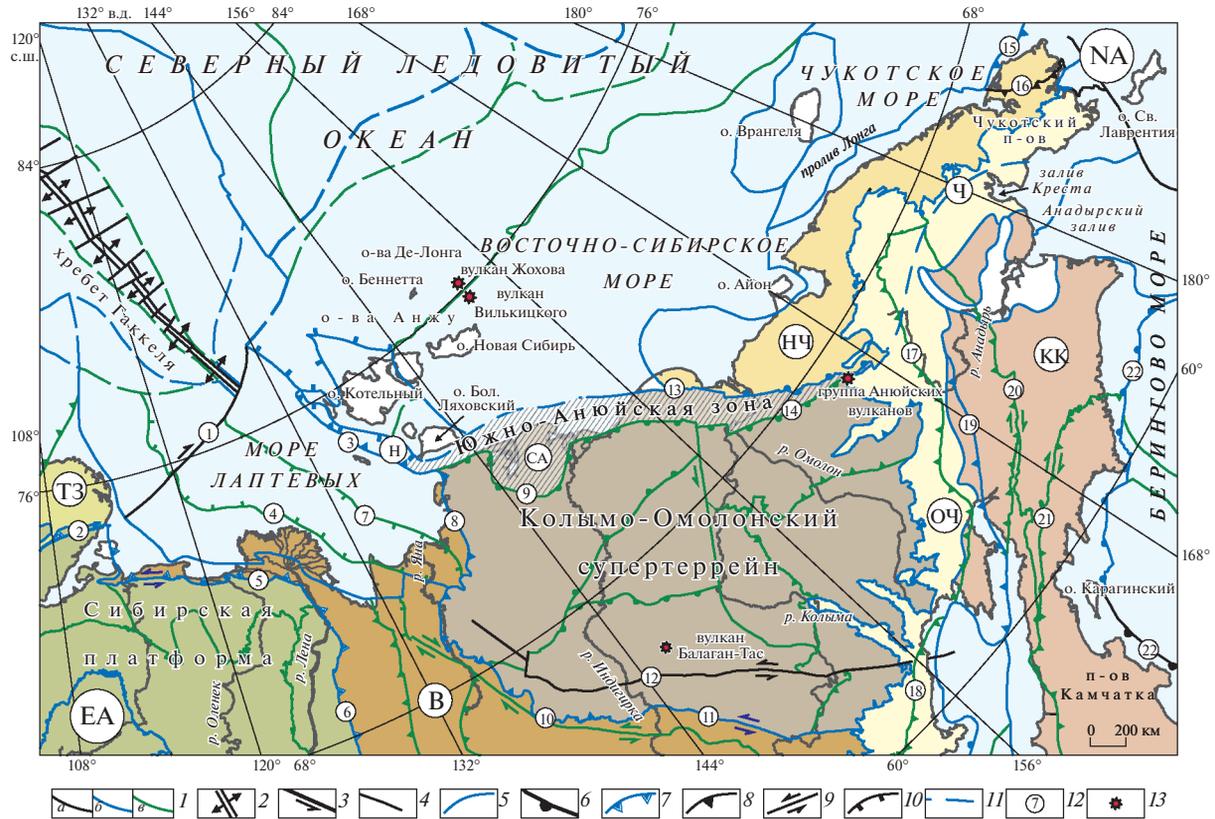


Рис. 1. Схема основных тектонических элементов территории северо-востока России (составлена с использованием материалов [17, 23–25]).

Обозначены литосферные плиты: EA – Евразийская, NA – Североамериканская.

Обозначены трансрегиональные тектонические структуры: *покровно-складчатые области*: ТЗ – Таймыро-Североземельская, НЧ – Новосибирско-Чукотская, КК – Корякско-Камчатская; В – Верхоянский складчато-надвиговый пояс; ОЧ – Охотско-Чукотский вулканогенный пояс. Обозначены сегменты Южно-Аноийской шовной зоны: Н – Новосибирский, СА – Святоносско-Аноийский, Ч – Чукотский.

1 – ранг границ: а – суперглобальный, б – трансрегиональный, в – региональный; 2 – раздвиг в зоне спрединга; 3 – трансформный разлом; 4 – условная граница; 5 – геологическая граница; 6 – субдукционный шов; 7 – краевой шов; 8 – надвиговый шов; 9 – сдвиговый шов; 10 – сброс; 11 – предполагаемое продолжение Южно-Аноийской сuture; 12 – граничные разломы: 1 – Хатангско-Ломоносовский, 2 – Южно-Таймырский, 3 – Бельковско-Святоносский, 4 – Усть-Янский, 5 – Лено-Анабарский, 6 – Западно-Верхоянский, 7 – Лазаревский, 8 – Яна-Святоносский, 9 – Хромский, 10 – Адыча-Тарынский, 11 – Чай-Юреинский, 12 – Улахан, 13 – Ярканский, 14 – Уямкандинский, 15 – Чукотский, 16 – Колочинско-Мечигменский, 17 – Верхнеанадырский, 18 – Челомджа-Ямский, 19 – Тайгоносско-Орловский, 20 – Майнский, 21 – Ватынско-Вывенский, 22 – Валагинский; 13 – кайнозойские вулканы

Рассмотренные граничные шовные зоны северо-западного фланга Колымо-Омолонского супертеррейна в плане составляют единый Полоусненско-Колымский коллизионный шов, который предположительно продолжается в акваторию моря Лаптевых, по [14]. На основе предварительных палеомагнитных данных, указано [14] на потенциальную возможность вовлечения Новосибирского блока, наряду с аналогичными по строению блоками Колымской петли, в тектоническую эволюцию Верхояно-Чукотских мезозойд.

В течение новейшего этапа своего развития в северо-западной и центральной зонах Колымо-Омолонского супертеррейна сформирована сейсмотектоническая зона Черского (см. рис. 2),

которая характеризуется высокой степенью геодинамической активности и многими исследователями северо-востока Азии трактуется как континентальный сегмент Арктико-Азиатского сейсмического пояса [2, 20, 32, 33, 38]. По серии северо-западных разломов преимущественно левосдвиговой кинематики, террейны разобщены на отдельные разломно-блоковые структуры и отличаются существенными вариациями режимов современных сейсмотектонических деформаций (см. рис. 2). Параметры очагов землетрясений позволили совместно с геолого-геофизическими данными определить направления главных осей деформаций напряженно-деформированного состояния земной коры и обосновать закономер-

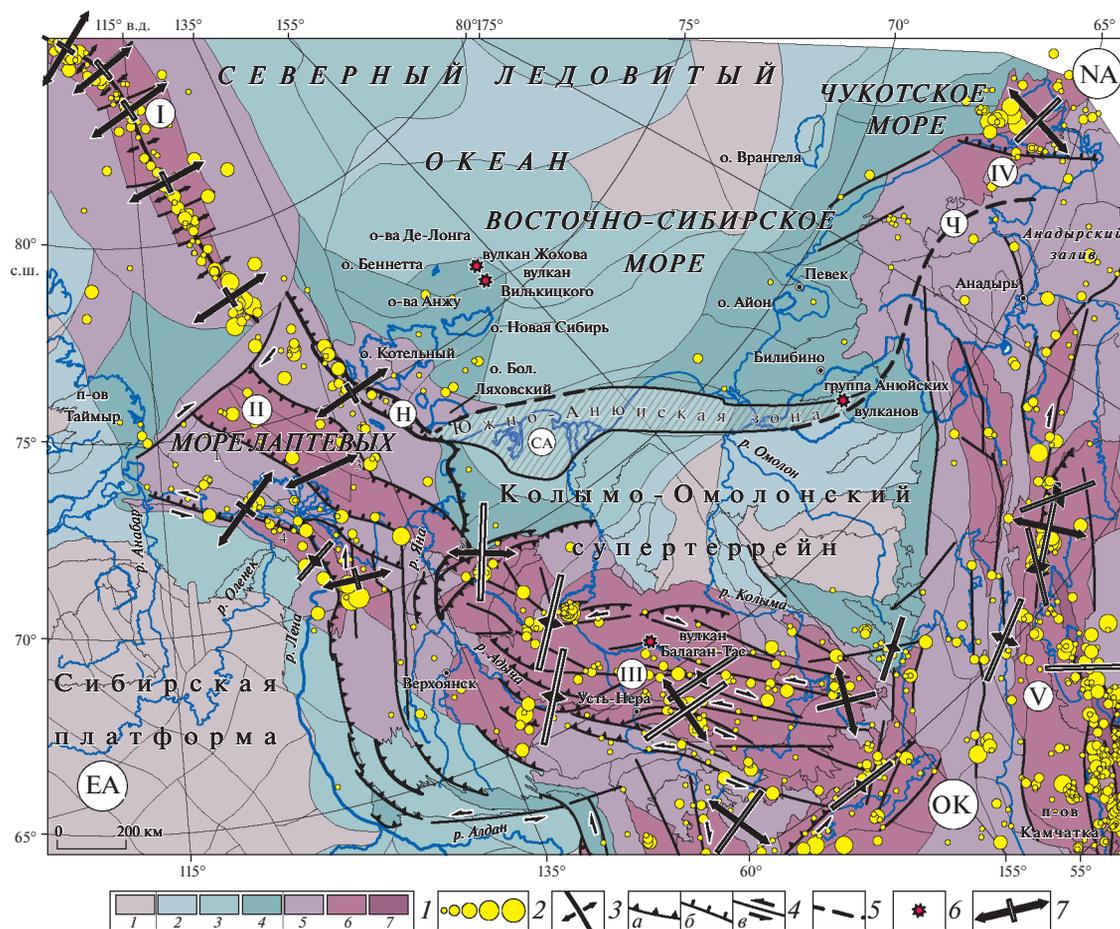


Рис. 2. Схема геодинамической активности новейших структур северо-восточного сектора Российской Арктики (составлена с использованием материалов [20, 38]).

Обозначены литосферные плиты: EA – Евразийская, NA – Североамериканская, OK – Охотоморская. Обозначены активные сегменты (римские цифры) сейсмических поясов: *Арктико-Азиатский*: I – спрединговый хребт Гаккеля, II – рифтовая система моря Лаптевых, III – сеймотектоническая зона Черского; *Охотско-Чукотский*: IV – Чукотский, V – Корякско-Камчатский. Обозначены сегменты Южно-Ануйской шовной зоны: Н – Новосибирский, СА – Святоносско-Ануйский, Ч – Чукотский.

I – классы геодинамической активности: 1 – низкой, 2–4 – умеренной, 5–7 – высокой; 2 – эпицентры землетрясений, соответственно, с магнитудой (M_w): ≤ 4.0 , 4.1–5.0, 5.1–6.0, 6.1–7.0, ≥ 7.0 ; 3 – раздвиг в зоне спрединга; 4 – кинематика активных разломов: а – надвиг, б – сброс, в – сдвиг; 5 – предполагаемое продолжение Южно-Ануйской сутуры; б – кайнозойские вулканы; 7 – горизонтальная проекция главных осей сеймотектонических деформаций, длина стрелок соответствует форме тензора деформаций и определенному сеймотектоническому режиму

ность смены тектонических режимов в зоне взаимодействия структур Колымо-Омолонского супертеррейна и Южно-Ануйской сутуры.

Тектонические структуры Южно-Ануйской зоны

Южно-Ануйская шовная зона (сутура) рассматривается как одна из главных тектонических границ арктического региона, которая разделяет террейны северо-восточной части Азиатского континента и Восточной Арктики [15, 16, 22, 23]. Вопросы границы Южно-Ануйской сутуры, ее возраст, западное и восточное продолжение, а также главные закономерности образования и эволюции остаются дискуссионными. Различные

варианты этих положений детально рассмотрены в работах [3, 14–16, 22, 23], где отмечается исключительно сложное строение Южно-Ануйской зоны деформаций, несколько генераций складок и разновозрастные системы разломов.

Южно-Ануйская сutura предположительно прослеживается от о. Большой Ляховский в восточной части моря Лаптевых и далее трассируется на юго-восток под кайнозойским чехлом Приморской низменности до верховьев р. Большой Ануй (см. рис. 1, см. рис. 2). Восточное ее продолжение несогласно перекрывается вулканогенно-осадочными образованиями Охотско-Чукотского пояса и предположительно проводится в различных вариациях до бухт северной окраины

Таблица 1. Параметры исследуемых землетрясений.

Дата: год, месяц, день	t_0^* , ч, мин, с	Эпицентр*		mb^*	Диапазон эпицентральных расстояний, град	Диапазон периодов, с	Кол-во станций
		λ° , E	φ° , N				
1994.09.23	02:11:37.1	145.67	76.33	4.6	23.23–52.94	30–65	10
1995.10.02	01:35:48.5	179.14	66.66	5.1	27.83–53.76	30–75	10
1995.10.03	11:56:13.9	179.71	66.63	4.6	27.81–48.77	25–65	7
2007.03.16	21:08:10.4	140.61	70.00	4.4	23.13–55.10	30–65	8
2009.04.21	12:22:34.4	168.61	64.59	5.0	18.31–48.36	30–75	12
2010.02.14	13:59:45.5	168.19	64.52	4.1	29.64–45.41	25–60	5
2012.04.05	18:42:33.8	136.45	74.88	4.5	22.50–46.64	30–65	15
2014.05.29	05:07:33.5	140.05	70.81	4.7	30.11–54.82	40–70	12

Примечание. mb – магнитуда, определяемая по объемным волнам; * – параметры приведены по ISC-каталогу [36].

Анадырского залива [15, 16, 23]. К северу от сутуры расположены структуры Новосибирско-Чукотской покровно-складчатой области, сложенные древними кристаллическими сланцами докембрия с палеозойско-мезозойским осадочным чехлом. Южнее находятся деформационные структуры северного фланга Колымо-Омолонского супертеррейна, сложенные, главным образом, островодужными террейнами палеозойского и мезозойского возраста и принадлежащие структурам Колымской петли [23].

Отдельные сегменты Южно-Анюйской сутуры характеризуются различными параметрами напряженно-деформированного состояния земной коры и неоднородным полем активизации современной геодинамической активности (см. рис. 2). В сейсмическом отношении наиболее активны Новосибирский и Чукотский сегменты, где они формируют контактные зоны сопряжения со структурами северо-западного фланга Колымо-Омолонского супертеррейна, Новосибирско-Чукотской и Корякско-Камчатской покровно-складчатых областей (см. рис. 1, рис. 2). На восточном фланге субширотного Святоносско-Анюйского сегмента сутуры расположена группа вулканов среднечетвертичного возраста (0.248 ± 0.030 млн лет, по [19]), вулканические центры которой закономерно фиксируют зону растяжения в тыловой части данного сегмента, имеющей структурные признаки лево-сдвиговой кинематики.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Недостаточное количество сейсмических станций в северо-восточном сегменте территории России, особенно в акватории Арктических морей, накладывает существенные ограничения на определение параметров напряженно-деформированного состояния земной коры сейсмическими методами. Для континентально-шельфовой зоны Арктического сектора территории северо-востока России впервые были получены данные

по очаговым параметрам землетрясений (фокальный механизм, скалярный сейсмический момент, моментальная магнитуда и глубина гипоцентра) умеренных магнитуд ($mb \geq 4.1$), которые позволили более аргументировано определить кинематический тип подвижек в активных сегментах зоны сопряжения Колымо-Омолонского супертеррейна и Южно-Анюйской сутуры. Для трех сейсмических событий, где в Global CMT-каталоге [35] содержатся данные по тензору момента и центруиду, решения фокальных механизмов очагов землетрясений были переопределены.

С помощью метода расчета тензора сейсмического момента по амплитудным спектрам поверхностных волн [4, 39] обработка исходных данных и их инверсия осуществлялись в два этапа.

На первом этапе были рассчитаны амплитудные спектры основной моды поверхностных волн с помощью процедуры спектрально-временного анализа [13]. Расчет производился по записям рассматриваемых сейсмических событий на широкополосных цифровых станциях сетей IRIS и виртуальной сети GLISN, развернутой в Гренландии и прилегающих районах [27]. Для дальнейшего анализа отбирались только те землетрясения, для которых удалось выделить волны Рэ-ля и Лява с низким уровнем шума и нормальной поляризацией более чем на трех станциях, расположенных в разных азимутах от эпицентра. Амплитудные спектры поверхностных волн (в интервале периодов 25–75 с) были получены для восьми событий (табл. 1), зарегистрированных на 38 сейсмических станциях. Показаны азимутальные распределения используемых сейсмических станций с примерами фильтрации записей поверхностных волн (рис. 3).

На втором этапе была проведена инверсия рассчитанных амплитудных спектров в очаговые параметры землетрясений в приближении источника в виде двойной пары сил [4]. Для определения единственного механизма очага в качестве

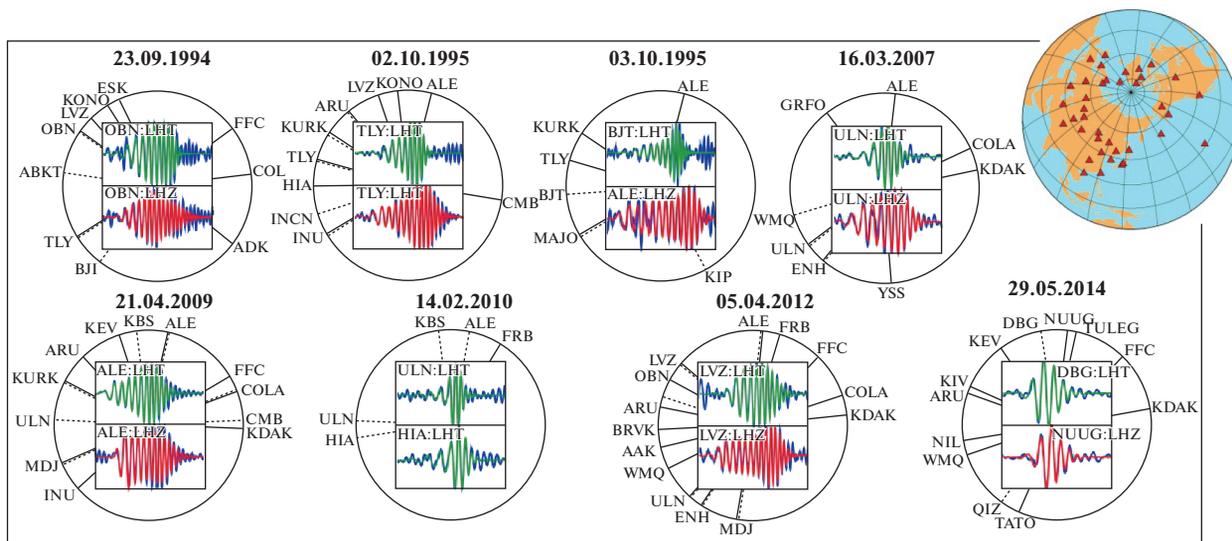


Рис. 3. Схема азимутальных распределений сейсмических станций относительно очагов землетрясений ($m_b \geq 4.4$) с примерами фильтрации волн Рэля и Лява для вертикальной (LHZ) и трансверсальной (LHT) компонент соответственно (по [13, 27]).

Показаны (сплошные и пунктирные линии) постоянные сейсмологические станции, на которых были выделены только волны Рэля и Лява соответственно. Обозначены (вверху справа) сейсмические станции, используемые для анализа.

дополнительной информации использовались знаки первых вступлений P -волн, представленные в ISC-каталоге [39]. Для описания строения земной коры под сейсмическими станциями использовалась глобальная модель 3SMAC [43]. Расчеты проводились для двух моделей в окрестности очагов рассматриваемых сейсмических событий: 3SMAC и CRUST2.0 [26], при этом очаговые параметры, полученные для разных моделей, близки друг к другу. Структура верхней мантии была задана моделью PREM [30]. Приведены очаговые параметры землетрясений умеренных магнитуд с $M_w \geq 4.3$ (табл. 2). Качество полученных нами результатов оценивалось по значениям функции нормированной невязки (ϵ), которая отражает расхождение между наблюдаемыми и синтетическими амплитудными спектрами поверхностных волн. Данная функция показывает, какое количество знаков первых вступлений объемных волн, относительно их общего числа, не удовлетворяет расчетной диаграмме направленности излучения [39]. Надежными считаются решения с $\epsilon < 0.4$, корректность наших определений следует из низких значений данной функции (см. табл. 2).

В сеймотектоническом анализе также использовались данные по средним тензорам сеймотектонических деформаций, рассчитанные в сейсмоактивных объемах земной коры при условии их однородного деформирования [20]. В основу расчета и анализа параметров средних сеймотектонических деформаций были заложены данные фокальных механизмов очагов землетря-

сений с $M_w \geq 4.5$, аккумулированные в международных сейсмологических центрах [35–37]. Приведены результаты расчетов, выполненных для основных эпицентральных полей региона (табл. 3). Направления главных осей сеймотектонических деформаций земной коры вынесены на схему геодинамической активности новейших структур северо-восточного сектора Российской Арктики (см. рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Сеймотектонические деформации северо-западного фланга Колымо-Омолонского супертеррейна

Новейшие структуры северо-западного фланга Колымо-Омолонского супертеррейна обладают повышенным уровнем сейсмической активности. Здесь в условиях горизонтального сжатия сформированы Адыча-Тарынский, Андрей-Тасский и Полоусненский сейсмические максимумы (рис. 4). Наиболее интенсивен из них – Андрей-Тасский сейсмический максимум, где только в течение 1962–2014 гг. произошло 12 сильных землетрясений с $M_w = 5.0–6.7$. Режим сжатия подтверждается характеристиками средних тензоров сеймотектонических деформаций и параметрами решений фокальных механизмов очагов сильных землетрясений, которые зарегистрированы в зонах влияния активных разломов и шовных зон различного ранга (см. рис. 4). Если проанализи-

Таблица 2. Очаговые параметры исследуемых землетрясений.

Дата: число, месяц, год	$M_0 \times 10^{16}$, Н м	M_w	h , км	Нодальные плоскости			ϵ	Стереодиаграмма фокального механизма (нижняя полусфера)	Модель коры
				azm°	dip°	slip°			
23.09.1994	1.10	4.7	39	286 22	62 79	168 29	0.246		CRUST2.0
02.10.1995*	14.00	5.4	38	31 171	45 53	121 63	0.280		CRUST2.0
03.10.1995	0.37	4.3	4	165 73	88 44	46 177	0.148		3SMAC
16.03.2007	0.49	4.4	12	73 177	60 68	-26 -146	0.224		3SMAC
21.04.2009*	2.60	4.9	14	166 267	76 52	141 18	0.279		CRUST2.0
14.02.2010	0.90	4.6	13	132 235	11 88	167 79	0.161		CRUST2.0
05.04.2012	1.40	4.7	7	194 327	7 85	137 85	0.209		CRUST2.0
29.05.2014*	2.60	4.9	10–11	57 157	42 81	-13 -131	0.263		3SMAC

Примечание. * – решение механизмов очага землетрясения было переопределено; $M_0 \times 10^{16}$, Н м – скалярный сейсмический момент (Ньютон/метр); M_w – моментная магнитуда; параметры нодальной плоскости: stk – простирание, dip – падение, slip – подвижка, в градусах; ϵ – функция нормированной невязки.

ровать тип перемещений в очагах крупных сейсмических событий ($M_w \geq 6.0$), произошедших на северо-западном фланге Колымо-Омолонского супертеррейна, то можно констатировать, что все они происходят в условиях устойчивого северо-восточного сжатия. При этом сжимающие усилия близгоризонтальны (углы падения 3° – 44°) и действуют вкрест простирания структурных элементов территории. Напряжения растяжения часто совпадают по простиранию с линиями разломов и ориентированы как горизонтально, так и близвертикально по отношению к земной поверхности (углы падения 2° – 85°). Оси промежуточного напряжения имеют беспорядочную пространственную ориентацию и широкий интервал углов падения – от 0° до 82° . Кинематика главных тектонических напряжений, выявленная по сейсмологическим данным, указывает на то, что большинство фокальных механизмов очагов землетрясений соответствует взбросам, надвигам и сдвигам.

Для Андрей-Тасского и Полоусненского сейсмических максимумов получены сходные характеристики средних тензоров сейсмотектониче-

ских деформаций (см. рис. 2, см. рис. 4). Для центральной зоны Полоусно-Дебинского террейна выявлен переходный режим – от сдвига к сжатию с субгоризонтальной ориентацией главных осей деформаций и субширотным растяжением. Ориентация главных напряжений сейсмотектонических деформаций и характер смещений в очаге наиболее сильного события с $M_w = 6.2$ соответствуют данному деформационному режиму. В Андрей-Тасском блоке отчетливо проявляется режим сжатия с ориентацией осей сейсмотектонических деформаций в северо-восток–юго-западном направлении. В очаге наиболее сильного Илинь-Тасского землетрясения ($M_w = 6.7$) наблюдаются те же закономерности, при этом субширотные плоскости разрыва следуют простиранию основных структурных элементов данной складчатой системы. Аналогичный сейсмотектонический режим характерен и для Адыча-Тарынской шовной зоны, где кинематический тип фокального механизма очага землетрясения с $M_w = 6.4$ полностью соответствует режиму сжатия.

Для фронтальной зоны Полоусно-Дебинского террейна Колымо-Омолонского супертеррейна

Таблица 3. Параметры механизмов очагов землетрясений с $M_w \geq 4.5$ зоны сопряжения Колымо-Омолонского супертеррейна и Южно-Ануйской сутуры.

Дата: число, месяц, год; Время: ч, мин, с	Координаты гипоцентра			M_w	Механизм очага			Стереодиаграмма фокального механизма в проекции нижней полусферы	Источник	Тип подвижки
	φ , °N	λ , °E	h , км		stk°	dip°	slip°			
12.02.1951 17:22:05	65.8	137.00	10	6.4	292	29	62		F, 2009	Надвиг и взброс
30.10.1959 5:00:31	66.1	137.6	15	5.3	150	40	90		F, 2009	Взброс
19.04.1962 23:16:04	69.80	138.98	—	6.2	287	51	82		F, 2009	Взброс
09.09.1968 02:20:59	66.17	142.13	39	5.0	156	65	170		F, 2009	Сдвиг
07.04.1969 20:26:31	76.5	130.8	33	5.4	157	45	-73		F, 2009	Сброс
15.12.1973 23:31:43	74.11	147.04	33	4.9	280	38	41		F, 2009	Взброс
21.01.1976 06:01:49	67.70	140.20	—	5.0	359	80	149		F, 2009	Левый сдвиг
23.04.1977 14:49:09	75.23	134.38	37	4.9	180	45	-90		HRVD	Сброс
12.08.1984 15:28:03	74.8	136.6	—	5.0	134	45	-126		F, 2009	Сброс
22.11.1984 13:52:55.40	69.11	140.13	26	5.1	341	45	158		HRVD	Взброс с левым сдвигом
19.10.1986 18:31:03	64.06	-179.22	15	5.4	337	68	4		HRVD	Правый сдвиг
22.09.1987 22:05:18	76.02	134.50	15	5.5	159	52	-107		HRVD	Сброс
13.10.1988 00:32:16	61.89	169.61	15	5.6	170	77	39		HRVD	Взброс с левым сдвигом
05.08.1989 06:55:56	75.72	133.90	15	5.3	348	40	-93		HRVD	Сброс
13.03.1990 00:32:56	73.08	136.66	15	5.3	186	45	-90		HRVD	Сброс

Таблица 3. Продолжение.

Дата: число, месяц, год; Время: ч, мин, с	Координаты гипоцентра			M_w	Механизм очага			Стереограмма фокального механизма в проекции нижней полусферы	Источник	Тип подвижки
	φ , °N	λ , °E	h , км		stk°	dip°	slip°			
08.03.1991 11:36:36	60.94	167.35	15	6.6	224	56	94		HRVD	Надвиг
31.01.1995 12:43:43	72.71	132.28	37	4.6	135	79	-34		С, 2017	Сбросо- сдвиг
02.10.1995 01:35:53	66.56	178.80	15	5.2	148	81	19		HRVD	Сдвиг
22.06.1996 16:47:17	75.53	135.07	15	5.8	349	63	-78		HRVD	Сброс
09.08.1996 18:33:30	64.90	-170.45	15	4.9	249	66	135		HRVD	Взброс
09.08.1996 18:45:46	64.56	-170.97	19	5.2	147	58	4		HRVD	Взброс
24.10.1996 19:31:58	67.02	-172.95	17	6.1	249	63	-134		HRVD	Сброс
03.11.1996 23:24:35	64.92	-171.06	15	5.2	238	82	-166		HRVD	Сдвиг
24.03.1997 06:56:17	67.07	-174.16	15	5.1	230	53	-160		HRVD	Сброс
07.01.1999 18:13:43	67.65	140.93	33	5.2	354	75	-173		HRVD	Сдвиг
07.12.2003 09:16:12	74.31	134.84	15	5.1	160	69	-118		F, 2009	Сброс
15.08.2005 21:24:32	74.60	134.03	7	4.5	205	15	-40		С, 2017	Сброс
20.04.2006 23:25:02	60.89	167.05	12	7.6	207	40	76		HRVD	Взброс
21.04.2006 11:14:15	61.27	167.64	14	6.0	212	52	90		HRVD	Взброс надвиг
22.04.2006 07:21:58	61.14	167.41	17	5.5	170	69	54		HRVD	Взброс надвиг

Таблица 3. Окончание.

Дата: число, месяц, год; Время: ч, мин, с	Координаты гипоцентра			M_w	Механизм очага			Стереодиаграмма фокального механизма в проекции нижней полусферы	Источник	Тип подвижки
	φ , °N	λ , °E	h , км		stk°	dip°	slip°			
29.04.2006 16:58:06	60.51	167.60	12	6.6	239	44	127		HRVD	Взброс
22.05.2006 11:12:00	60.86	165.81	12	6.6	344	87	-176		HRVD	Сдвиг
10.07.2006 15:30:29	65.82	-169.67	12.	4.9	247	48	-105		HRVD	Сброс
22.06.2008 23:56:39	67.71	141.43	21	6.1	345	57	141		GCMT	Взброс
04.07.2008 04:55:070	75.25	134.16	14	5.0	135	52	-132		GCMT	Сброс
07.10.2009 00:29:54	73.37	134.28	11	4.6	143	35	-147		С, 2017	Сброс
26.03.2012 09:30:18	66.38	-174.43	12	5.1	296	43	-44		GCMT	Сброс
14.02.2013 13:13:59	67.65	142.51	12	6.7	324	43	109		GCMT	Взброс
12.12.2014 07:42:57	74.21	130.46	33	4.6	177	62	-87		С, 2017	Сброс

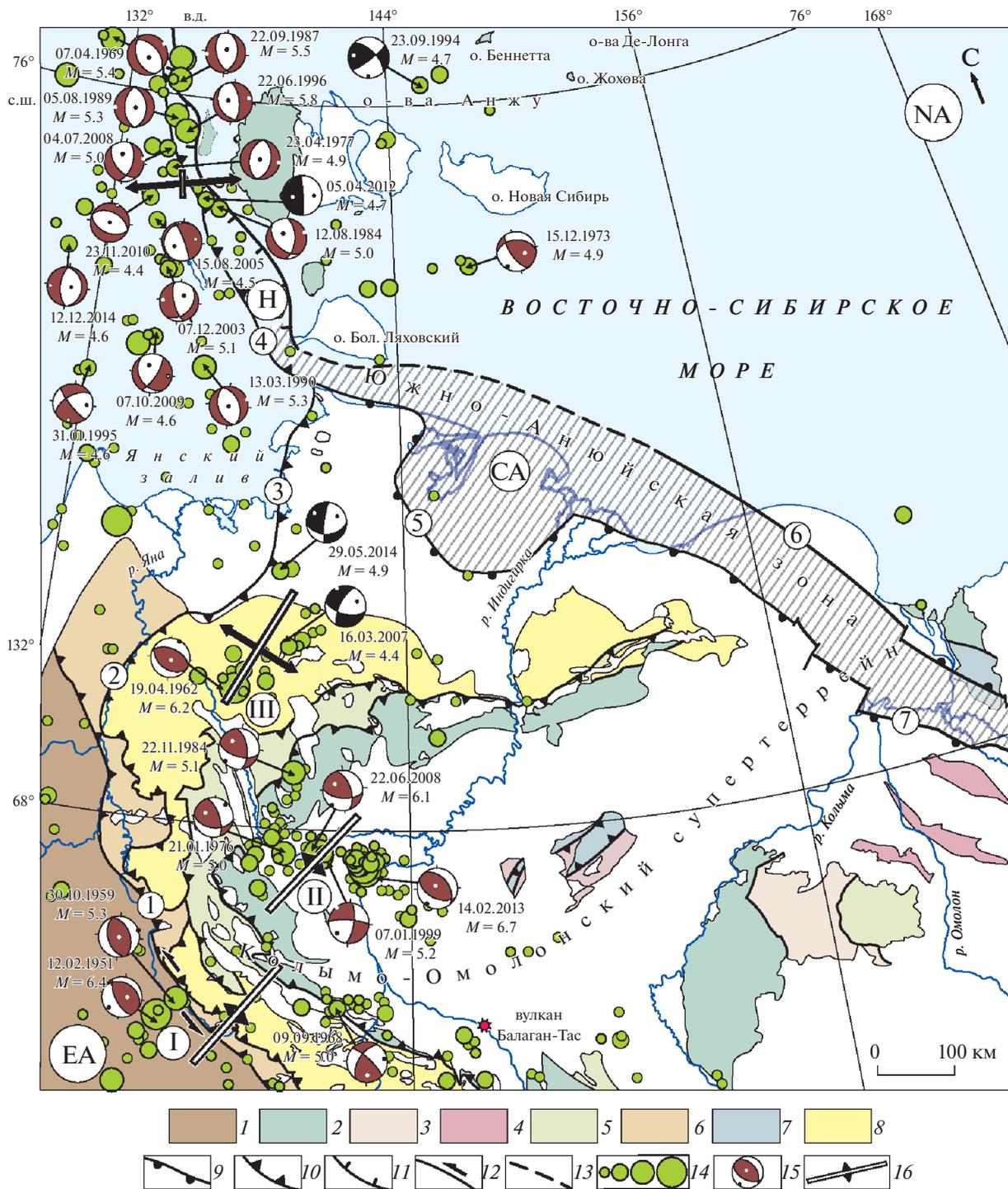
Примечание. M_w – моментная магнитуда; параметры нодальной плоскости: stk – простирание, dip – падение, slip – подвижка, в градусах. Источники: С, 2017 [21]; F, 2009 [32], HRVD [37], GCMT [35].

Рис. 4. Схема сеймотектоники зоны сопряжения северо-западного фланга Колымо-Омолонского супертеррейна и Южно-Ануйской сутуры (составлена с использованием материалов [17, 20, 24]).

Обозначено: литосферные плиты: EA – Евразийская, NA – Североамериканская; сегменты Южно-Ануйской шовной зоны: Н – Новосибирский, СА – Святоносско-Ануйский; граничные разломы: 1 – Адыча-Тарынский, 2 – Полоусненский, 3 – Яна-Святоносский, 4 – Бельковско-Святоносский, 5 – Хромский, 6 – Яркандский, 7 – Уямкандинский; максимумы сейсмической активности: I – Адыча-Тарынский, II – Андрей-Тасский, III – Полоусненский.

Показаны фокальные механизмы очагов землетрясений: вошедшие в область расчета средних тензоров сеймотектонических деформаций (коричнево-белые стереодиаграммы); новые решения (черно-белые стереодиаграммы).

1 – Верхоянский складчато-надвиговый пояс; 2 – миогеоклинальные террейны; 3 – кратонный терреин Омолонский; 4 – островодужные террейны; 5 – турбидитовые террейны; 6 – Кулар-Нерский терреин; 7 – террейны аккреционного клина; 8 – Полоусно-Дебинский терреин; 9–12 – границы тектонических структур: 9 – субдукционный шов, 10 – надвиговый шов, 11 – сброс, 12 – сдвиговый шов; 13 – предполагаемое продолжение Южно-Ануйской сутуры; 14 – эпицентры землетрясений, соответственно, с магнитудой (M_w): ≤4.0, 4.1–5.0, 5.1–6.0, 6.1–7.0; 15 – фокальные механизмы землетрясений: дата возникновения события и магнитуда (нижняя полусфера), выходы осей главных напряжений сжатия (черные точки) и растяжения (белые точки); 16 – горизонтальная проекция главных осей деформаций: длина стрелок соответствует форме тензора деформаций и определенному сеймотектоническому режиму



впервые получены очаговые параметры землетрясений умеренных магнитуд ($M_w = 4.4-4.9$), которые не вошли в расчет средних тензоров сейсмоструктурных деформаций (см. рис. 4). По данным фокальных механизмов очагов этих событий (см. табл. 2), в области динамического влияния Яна-Святоносского трансрегионального

шва при северо-восточном сжатии фиксируются крутые сбросы и сбросо-сдвиги, что нетипично для кинематических характеристик структур северного фланга Полуосно-Дебинского террейна. Нодальные плоскости разрывов растяжения, формируемые в очагах землетрясений, совпадают с северо-западным простиранием юго-восточно-

го окончания Усть-Янского грабена Лаптевоморской рифтовой системы (см. рис. 1, рис. 2, рис. 4). Этот факт, возможно, является свидетельством влияния процесса активного рифтогенеза, протекающего в акватории моря Лаптевых, на континент.

В центральной части Колымо-Омолонского супертеррейна ось главной деформации сейсмотектонических напряжений сменяет простирание северо-восточного сжатия на субширотное (см. рис. 2, см. рис. 4). Аналогичная система напряжений наблюдается и в очаге местного землетрясения с $M_w = 5.6$, произошедшего в области динамического влияния разлома Улахан. В Чай-Юреинской сдвиговой зоне, по данным механизмов очагов землетрясений, доминирует сдвиговый режим сейсмотектонических деформаций с субширотным сжатием и субмеридиональным растяжением. Влияние сжимающих и растягивающих усилий здесь примерно сопоставимо, что выражается в пологих углах погружения главных осей напряжений. Подобный сейсмологический режим с небольшими вариациями наблюдается и в очаге Артыкского землетрясения с $M_w = 6.4$. Остальные области расчета сейсмотектонических деформаций, сконцентрированные на юго-восточном фланге Колымо-Омолонского супертеррейна, характеризуются параметрами сейсмотектонических деформаций, направление которых не согласуется с системами напряжений в очагах сильных событий (см. рис. 2). Возможно, это факт связан с наложением в данном деформационном поле напряжений, которые типичны для сейсмогенерирующих структур Арктико-Азиатского и Охотско-Чукотского сейсмических поясов.

Совместный анализ кинематики активных разломов и параметров сейсмотектонических деформаций, проведенный для фронтальной северо-западной зоны Колымо-Омолонского супертеррейна, свидетельствует о главенствующей роли обстановки сжатия, где сжимающие напряжения действуют в направлении северо-восток–юго-запад по азимуту 30° – 80° (см. рис. 2, см. рис. 4). Для всех сейсмических событий характерны смещения в очаге землетрясений типа взброса, сдвига или их сочетаний. Одна из плоскостей разрыва является субвертикальной или круто наклоненной к северо-востоку и имеет, как правило, субдолготное простирание, другая плоскость разрыва ориентирована близширотно. Все крупные сейсмические события тяготеют к границам отдельных блоков, оконтуренных сейсмоактивными разломами, и не затрагивают собой их внутреннее пространство, подчиняясь направлению горизонтального перемещения блоков. Отдельные пластины выдвинуты в направлении на север и северо-запад, подчеркивая тенденцию выдавливания материала.

Таким образом, на северо-западном фланге Колымо-Омолонского супертеррейна имеет место определенная кинематическая обстановка, обусловленная сближением Североамериканской и Евразийской литосферных плит в субширотном направлении. При этом роль активного индентора выполняет Колымо-Омолонский блок, находящийся во фронтальной части Североамериканской плиты [8, 10, 20]. Результат такого воздействия проявился в активизации шовных зон и формировании перед фронтальной частью индентора расходящихся сдвигов противоположной кинематики, формирующих на своих окончаниях структуры взбросов и надвигов, обладающих максимальным сейсмическим потенциалом. Следует отметить, что подобная динамика новейших структур, возникающих при деформации горизонтального (латерального) выжимания, нами была детально изучена при рассмотрении главных сейсмогенерирующих зон Арктико-Азиатского сейсмического пояса [8, 20, 38].

Сейсмотектонические деформации активных сегментов Южно-Ануйской сутуры

В сейсмическом отношении Южно-Ануйская сutura отличается неоднородным уровнем активизации, что, возможно, отражает практически полное отсутствие региональных сейсмических станций вдоль ее трассы. Наиболее активизированы Новосибирский и Чукотский сегменты сутуры, обладающие высокой степенью современной геодинамической активности (см. рис. 2). В зоне динамического влияния деформационных структур Святоносско-Ануйского сегмента зарегистрированы лишь единичные сейсмические события малых и средних магнитуд с $M_w = 3.5$ – 4.5 .

Новосибирский сегмент. В общем эпицентральном поле сейсмичности Новосибирский сегмент Южно-Ануйской сутуры выделяется зоной повышенной плотности эпицентров землетрясений, приуроченной к Бельковско-Святоносскому разлому, который с востока ограничивает Усть-Янский грабен Лаптевоморской рифтовой системы (см. рис. 1). Практически во всех очагах землетрясения этой зоны реализуются подвижки с механизмом растяжения (транстенсии) с одной или двумя нодальными плоскостями, параллельными простиранию грабенов (см. рис. 4). Фокальные глубины землетрясений возрастают от 10 до 25 км по направлению к югу. Эти данные указывают на то, что режим растяжения, связанный с динамикой срединно-океанического хр. Гаккеля, распространяется за пределы его южного окончания на шельф моря Лаптевых и возможно прибрежные районы континента.

На основе анализа фокальных механизмов очагов местных землетрясений, произошедших в рифтовых впадинах восточной окраины шельфа

моря Лаптевых, осуществлялся расчет средних тензоров сейсмоструктурных деформаций. Полученные данные однозначно свидетельствуют о том, что в указанных областях доминирует сейсмоструктурный режим растяжения. Главные оси напряжений растяжения располагаются субширотно, вкрест простирания основных структурных элементов и при пологих углах погружения имеют северо-восток–юго-западное направление (см. рис. 2, см. рис. 4). Неоднозначно трактуются параметры фокального механизма очага землетрясения умеренных магнитуд ($M_w = 4.7$), которое произошло 05.04.2012 г. в зоне динамического влияния Бельковско-Святоносского шва (см. рис. 4, см. табл. 2). При направлении сжатия с северо-востока на юго-запад по северо-западной плоскости, совпадающей с простиранием одноименной шовной зоной, здесь могли равнозначно реализоваться подвижки как крутого взброса (взреза), так и крутого сброса.

В западной части акватории Восточно-Сибирского моря отмечены два землетрясения, очаговые параметры которых не вошли в расчеты средних тензоров сейсмоструктурных деформаций. Решение фокального механизма землетрясения с $M_w = 4.7$, отмеченного 23.09.1994 г., существенно отличается от всех сейсмических событий, произошедших в Новосибирском сегменте Южно-Ануйской сутуры (см. рис. 4, см. табл. 2). При субдолготном сжатии в его очаге фиксируются сдвиги-взбросы. Другое сейсмическое событие ($M_w = 4.9$) со взбросовым механизмом в его очаге произошло 15.12.1973 г. к северо-востоку от о. Большой Ляховский. Свидетельством того, что процессы растяжения, характерные для кайнозойской истории шельфа Восточной Арктики, в конце миоцена были нарушены эпизодом сжатия, является факт наличия на островах Анжу линейных складок в верхнемеловых и кайнозойских отложениях, сопряженных с надвигами [18]. Надвиги и складки несогласно перекрыты горизонтально залегающими верхнеплиоценовыми отложениями. На острове Новая Сибирь отмечены деформации плейстоценового (?) возраста, которые, по мнению авторов публикации [5, 6, 46, 47], вызваны гляциотектоникой во время регионального оледенения во второй половине среднего плейстоцена.

Чукотский сегмент. От верховьев р. Большой Ануй субширотный Святоносско-Ануйский сегмент сутуры предположительно продолжается на восток, что маркируется офиолитами, расположенными вблизи залива Креста Анадырского залива или бухты Провидения Берингового моря (см. рис. 1, рис. 2, рис. 5). По мнению многих авторов, Южно-Ануйская сутура здесь не заканчивается, а продолжается в пределы Центральной Аляски, образуя структурную зону, расположен-

ную в целом конформно складчатым структурам тихоокеанского обрамления [16, 42, 44, 45]. В сейсмическом отношении режимы деформационных полей Чукотского сегмента (от сжатия к растяжению) связаны с активизацией тектонических структур Новосибирско-Чукотской и Корякско-Камчатской покровно-складчатых областей (см. рис. 1, см. рис. 2, см. рис. 5).

В западной зоне контакта Чукотского сегмента сутуры с новейшими структурами Новосибирско-Чукотской покровно-складчатой области фиксируется режим сжатия. Здесь отмечены сейсмические события умеренных магнитуд ($M_w = 4.3-5.4$), характеристики очаговых зон которых указывают на взбросо-сдвиговый и надвиговой характер движения в их очагах (см. рис. 6, см. табл. 2). Реперными параметрами для этой зоны сегмента характеризуется землетрясение 02.10.1995 г. с $M_w = 5.2$. При субширотном сжатии в его очаге активизированы две сдвиговые плоскости: по субдолготной – правая, по субширотной – левая. Ориентация нодальных плоскостей в очаге данного сейсмического события свидетельствует о сопряжении в западной зоне Чукотского сегмента сдвиговых разломов, кинематика которых типична для новейших структур Чукотки, а также западной и южной зон Корякско-Камчатской покровно-складчатой области (см. рис. 5).

Геолого-структурные и геофизические исследования выявили в Корякско-Камчатской покровно-складчатой области активизированную систему взбросо-сдвигов северо-восточного простирания, современная активность которых определяется крупными сейсмическими событиями с $M_w = 5.3-6.6$ [10, 12, 20, 40]. Для данной области по сейсмологическим данным рассчитаны средние тензоры сейсмоструктурных деформаций и выявлены три режима деформирования, где основной из них характеризуется юго-восточным сжатием, которое проявилось в очаге землетрясения с $M_w = 6.6$ (см. рис. 2, см. рис. 5). Здесь, при влиянии субгоризонтальных сжимающих усилий и субгоризонтальном растяжении, выявлен сдвиговый сейсмоструктурный режим, которому соответствует механизм Олюторского землетрясения ($M_w = 7.6$). Менее масштабное деформационное поле в эпицентральной области этого землетрясения представлено еще одним режимом сжатия, но с северо-восток–юго-западной ориентацией оси сжатия. Следует отметить, что поля напряжений и типы деформаций, которые одновременно существуют в Корякско-Камчатской покровно-складчатой области, являются производными от главного тектонического режима конвергентного характера с право-сдвиговой составляющей [10, 20].

На восточном фланге Чукотского сегмента сутуры уровень сейсмической активности значи-

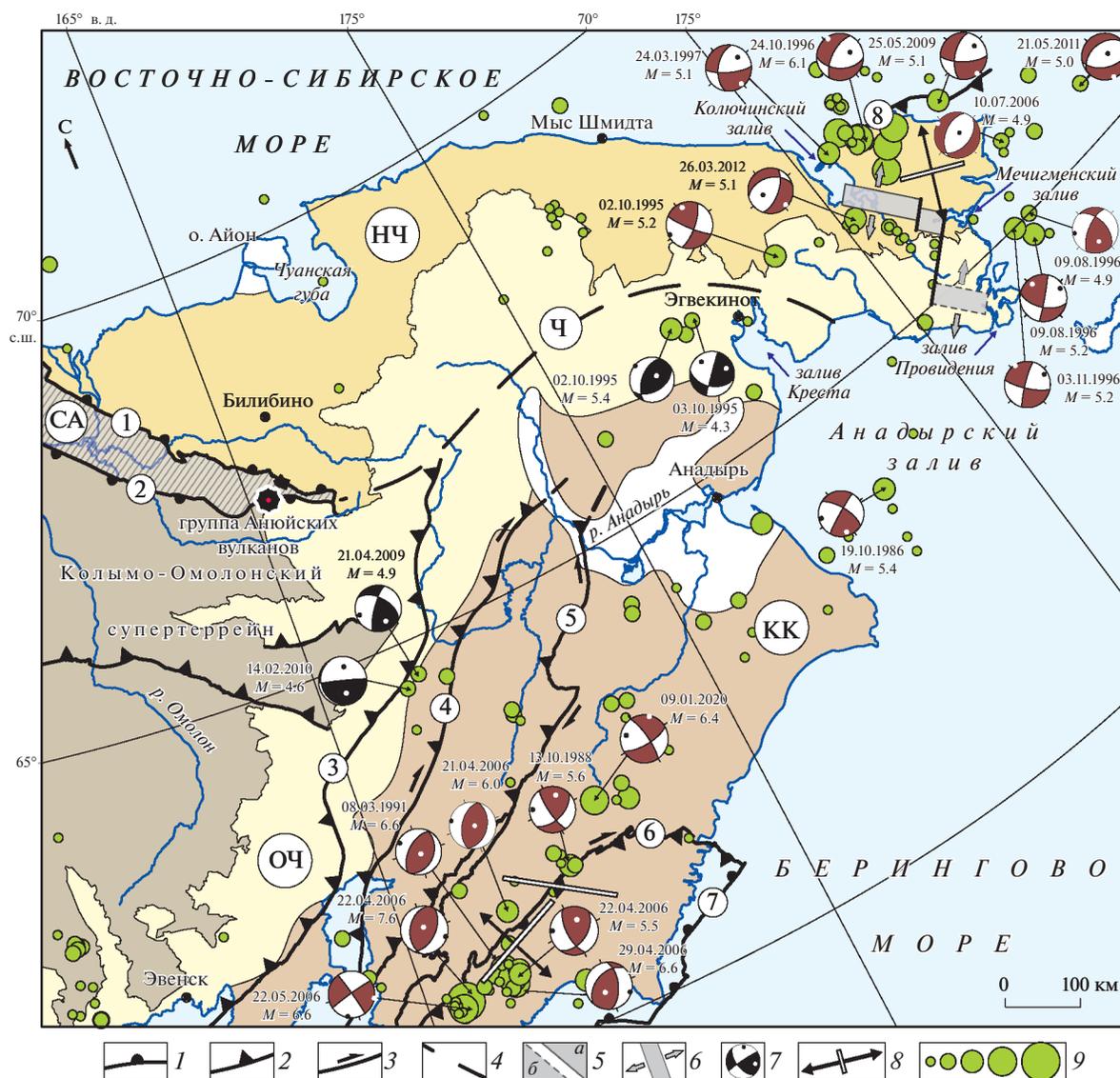


Рис. 5. Схема сеймотектоники Чукотского и Корьякского сегментов Охотско-Чукотского сейсмического пояса (составлена с использованием материалов [20, 23–25, 40]).

Показаны трансрегиональные тектонические структуры: покровно-складчатые области: НЧ – Новосибирско-Чукотская, КК – Корьякско-Камчатская; ОЧ – Охотско-Чукотский вулканогенный пояс; сегменты Южно-Анюйской шовной зоны: СА – Святоносско-Анюйский, Ч – Чукотский; *границные разломы*: 1 – Ярканский, 2 – Уямкандинский, 3 – Верхнеанадырский, 4 – Тайгоносско-Орловский, 5 – Майнский, 6 – Ватынско-Вывенский, 7 – Валагинский; 8 – Чукотский. Показаны фокальные механизмы очагов землетрясений: вошедшие в область расчета средних тензоров сеймотектонических деформаций (коричнево-белые стереограммы); новые решения (черно-белые стереограммы).

1–3 – границы тектонических структур: 1 – субдукционный шов, 2 – надвиговый шов, 3 – сдвиговый шов; 4 – предполагаемое продолжение Южно-Анюйской сутуры; 5 – кайнозойские рифтовые структуры: а – установленные, б – предполагаемые; 6 – направление растяжения; 7 – фокальные механизмы землетрясений: дата возникновения события и магнитуда (нижняя полусфера), выходы осей главных напряжений сжатия (черные точки) и растяжения (белые точки); 8 – горизонтальная проекция главных осей деформаций: длина стрелок соответствует форме тензора деформаций и определенному сеймотектоническому режиму; 9 – эпицентры землетрясений, соответственно с магнитудой (M_w): ≤ 4.0 , 4.1–5.0, 5.1–6.0, 6.1–7.0, ≥ 7

тельно возрастает. Здесь наиболее активным является Колюченско-Мечигменский район, в пределах которого отмечен ряд сейсмических событий с $M_w = 5.0–6.9$ (см. рис. 2, см. рис. 5). Группа землетрясений, сконцентрированная вбли-

зи Колючинского залива, прослеживается далее на юго-восток к заливу Провидения. В 1928 году здесь произошли четыре сильных землетрясения с магнитудами 6.2–6.9. Очаговые параметры землетрясений, зафиксированных в этом районе,

свидетельствуют о правостороннем сдвиге с северо-восточным положением активной плоскости разлома. По другой нодаальной плоскости, которая почти параллельна береговой линии, определяется режим растяжения (см. рис. 5). Определенная закономерность в распределении землетрясений прослеживается в направлении от Колючинского залива в Чукотское море, где зарегистрированы землетрясения с магнитудами $M_w = 5.0-6.0$, фокальные механизмы которых указывают на сбросовый характер движения в их очагах.

На основе анализа фокальных механизмов очагов местных землетрясений, произошедших на территории Чукотского сегмента, проводился расчет параметров сейсмоструктурных деформаций. Тип деструкции земной коры характеризуется здесь переходным режимом от сдвига к растяжению, а направление осей деформаций представлено северо-восток—юго-западным субгоризонтальным растяжением и северо-запад—юго-восточным наклонным сжатием (см. рис. 2, см. рис. 5). Влияние горизонтальных растягивающих тектонических напряжений выражается в развитии местных сбросов северо-западного простирания в сочетании со сдвигами, ограничивающими морфологически отчетливо выраженные неоген-четвертичные впадины Колючинско-Мечигменской зоны растяжения (см. рис. 5). Как отмечалось многими исследователями, разломы подобной кинематики являются трансформными между смещенными сегментами рифта Берингова моря [10, 20, 31, 48].

Рифтовая система Чукотского полуострова представляет собой зону растяжения, которая возникла между окончаниями двух крупных систем взбросов и правых сдвигов на Корякском нагорье—Чукотке (см. рис. 5). По данным инструментальных сейсмологических и геолого-структурных исследований, зона растяжения продолжается далее к полуострову Сьюард и правым сдвигам Западной Аляски [20, 29, 42, 48]. На полуострове Сьюард известно несколько сильных землетрясений с $M_w = 5.3-6.5$ [40, 41]. Далее эпицентры в основном слабых землетрясений ($2.5 < M_w < 4.0$) фиксируются от полуострова Сьюард через Берингов пролив к Чукотскому полуострову, представляя собой северную границу рифтовой системы. Материалами морских сейсмических работ здесь установлено существование разлома, ограничивающего зону опускания Колючинского залива [1], который является частью огромной системы кайнозойских рифтов, находящихся в южной части Чукотского моря. Возможно, отдельные структурные зоны Чукотского сегмента Южно-Ануйской сутуры, имеющие сходные кинематические характеристики, активизированы и вовлечены в процесс рифтообразования.

ВЫВОДЫ

Таким образом, активные сегменты зоны сопряжения Колымо-Омолонского супертеррейна и Южно-Ануйской сутуры характеризуется существенными вариациями режима сейсмоструктурных деформаций земной коры, но в то же время они составляют единую уравновешенную геодинамическую систему. На это указывают структурные композиции сопряженных разломов граничных шовных зон и определенные параметры напряженно-деформированного состояния земной коры, которые отражают закономерную смену геодинамических режимов. Нами установлены следующие режимы сейсмоструктурной деструкции земной коры:

1. Для новейших структур северо-западного фланга Колымо-Омолонского супертеррейна установлен режим транспрессии с левым сдвигом, обусловленный обстановкой устойчивого северо-восточного сжатия. Фронтальные шовные зоны граничных тектонических структур супертеррейна в плане составляют единый коллизионный шов, который, предположительно, продолжается в акваторию моря Лаптевых, где сочленяется со структурными элементами Южно-Ануйской сутуры. К северо-востоку от архипелага Новосибирских островов в акватории Восточно-Сибирского моря по сейсмологическим данным фиксируется режим сжатия.

2. На северо-западном фланге Полоусно-Дебинского террейна параметры фокальных механизмов очагов землетрясений умеренных магнитуд указывают на смешанное поле тектонических напряжений (различные комбинации растяжения и сжатия, с преобладанием режима растяжения), что может являться свидетельством возможного продолжения на континент юго-восточного окончания структур растяжения Усть-Янского грабена Лаптевоморской рифтовой системы.

3. В Чукотском сегменте сутуры на границе с Новосибирско-Чукотской покровно-складчатой областью фиксируется изменение режима сейсмоструктурной деструкции земной коры (от сжатия к растяжению), которое связано с наложением деформационных полей сопряженных тектонических структур. На западе сегмента под воздействием юго-восточных сжимающих напряжений сформировано взбросо-надвиговое деформационное поле, которое обусловлено режимом транспрессии в Корякско-Камчатской покровно-складчатой области. На северо-восточном фланге сутуры режим сейсмоструктурной деструкции земной коры характеризуется переходом от сдвига к растяжению, что связано с положением Берингоморского рифта, возникшего между окончаниями двух крупных систем взбросов (Корякском сегменте—Чукотке) и правых сдвигов (Западная Аляска).

Благодарности. В период подготовки материалов статьи ушел из жизни соавтор статьи профессор, докт. геол.-мин. наук В.С. Имаев. Авторы статьи посвящают статью его светлой памяти.

Авторы статьи признательны В.И. Мельниковой (ИЗК СО РАН, г. Иркутск) за предоставленные данные по средним тензорам сейсмоструктурных деформаций, А.В. Прокопьеву (ИГАИБМ, Якутск) за обсуждение проблем геологии и тектоники территории северо-востока России. Авторы благодарны М.Н. Шуплецово (ГИН РАН, г. Москва) за редактирование. Авторы благодарны рецензентам проф. С.Д. Соколову (ГИН РАН, г. Москва) и проф. Е.А. Рогожину (ИФЗ РАН, г. Москва) за комментарии.

Финансирование. Исследования проведены по проекту РФФИ № 19–05–00062 “Динамика новейших структур континентально-шельфовой зоны северо-восточного сектора Российской Арктики”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов А.А., Дунаев Н.Н., Ионин А.С., Калинин В.В., Медведев В.С., Павлидис Ю.А., Юркевич М.Г. Арктический шельф Евразии в позднечетвертичное время. М.: Наука, 1987. 275 с.
2. Богданов Н.А. Континентальные окраины: общие вопросы строения и тектонической эволюции // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, 2001. С. 231–249.
3. Бондаренко Г.Е. Тектоника и геодинамическая эволюция мезозойд северного обрамления Тихого океана. Автореф. дис. ... д. г.-м. н. М.: МГУ, 2004. 46 с.
4. Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 9. С. 34–41.
5. Голионко Б.Г., Басилян А.Э., Никольский П.А., Костылева В.В., Малышев Н.А., Вержбицкий В.Е., Обметко В.В., Бородулин А.А. Складчато-надвиговые деформации острова Новая Сибирь (Новосибирские острова, Россия) – возраст, морфология и генезис структур // Геотектоника. 2019. № 6. С. 46–64.
6. Данукалова М.К., Кузьмичев А.Б., Аристов В.А. Обстановка формирования верхнедевонских отложений острова Бельковский (Новосибирские острова): рифтогенный прогиб или окраина континента? // Геотектоника. 2014. № 5. С. 54–80.
7. Драчев С.С., Елистратов А.В., Савостин Л.А. Структура и сейсмостратиграфия шельфа Восточно-Сибирского моря вдоль сейсмического профиля “Индибирский залив – остров Жаннетты” // ДАН. 2001. Т. 377. № 4. С. 521–525.
8. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Динамика сейсмогенерирующих структур фронтальной зоны Колымо-Омолонского супертеррейна // Геотектоника. 2016. № 4. С. 3–21.
9. Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С., Маккей К.Г. Сейсмоструктурные исследования плейстоценовой области Илин-Тасского землетрясения с $M_s = 6.9$ (Северо-Восток Якутии) // Физика Земли. 2016. № 6. С. 39–53.
10. Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С., Ашуурков С.В., Мельникова В.И., Середкина А.И. Геодинамическая активность новейших структур и поля тектонических напряжений северо-востока Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0xxx>
11. Косыко М.К., Соболев Н.Н., Кораго Е.А., Проскурнин В.Ф., Столбов Н.М. Геология Новосибирских островов – основа интерпретации геофизических данных по Восточно-Арктическому шельфу России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013. Т. 8. № 2. С. 1–36.
12. Ландер А.В., Бугчин Б.Г., Кирюшин А.В., Дроздин Д.В. Тектоническое развитие и параметры источника Хайлинского землетрясения в Корьякии 8 марта 1991 г.: Существует ли Берингоморская плита? // Вычислительная сейсмология и геодинамика. 1996. Т. 3. С. 80–96.
13. Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г., Бармин М.П., Ратникова Л.И., Итс Е.Н. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. М.: Наука, 1986. 278 с.
14. Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Толмачева Т.Ю., Матушкин Н.Ю., Жданова А.И. Первые палеомагнитные данные для раннепалеозойских отложений Новосибирских островов (Восточно-Сибирское море): к вопросу формирования Южно-Анхойской сутуры и тектонической реконструкции Арктиды // Литосфера. 2014. № 3. С. 11–31.
15. Натальин Б.А. Строение и тектоническая эволюция Южно-Анхойской эвгеосинклинальной системы. Автореф. дис. ... к. г.-м. н. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 1981. 24 с.
16. Парфенов Л.М. Континентальные окраины и островные дуги мезозойд Северо-Востока Азии. Новосибирск: Наука, 1984. 191 с.
17. Парфенов Л.М., Оксман В.С., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Третьяков Ф.Ф., Трунилина В.А., Дейкуненко А.В. Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин (ред.). М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. С. 199–254.
18. Парфенов Л.М., Прокопьев А.В., Спектор В.Б. Рельеф земной поверхности и история его формирования // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин (ред.). М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. С. 12–32.
19. Певзнер М.М., Герцев Д.О., Федоров П.И., Романенко Ф.А., Куцева Ю.В. Анхойский вулкан на Чукотке: возраст, строение, особенности состава пород и извержения // Литология и полезн. ископаемые. 2017. № 1. С. 25–59.
20. Сейсмоструктурная северо-восточного сектора Российской Арктики / Л.П. Имаева, И.И. Колодезников (ред.). Новосибирск: СО РАН, 2017. 136 с.

21. *Середкина А.И.* Тензор сейсмического момента землетрясений Северного Верхоянья и шельфа моря Лаптевых / Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матлы XII Международн. сейсмол. школы, 11–15 сентября 2017 г., ФИЦ ЕГС РАН, АО “НЦСНИИ”, г. Алматы, Казахстан. – А.А. Маловичко (ред.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 338–341.
22. *Сеславинский К.Б.* Южно-Аннуйская сутура (Западная Чукотка) // Докл. АН СССР. 1979. Т. 249. № 5. С. 1181–1185.
23. *Соколов С.Д., Тучкова М.И., Ганелин А.В., Бондаренко Г.Е., Лейер П.* Тектоника Южно-Аннуйской сутуры (Северо-Восток Азии) // Геотектоника. 2015. № 1. С. 5–30.
24. Тектонический кодекс России / Н.В. Межеловский (ред.). М.: ГЕОКАРТ–ГЕОС, 2016. 240 с.
25. *Тильман С.М., Богданов Н.А.* Тектоническая карта Северо-Востока Азии. М-6 1 : 5000000 / Ю.М. Пущаровский (ред.). М.: Картография, 1992. 1 лист.
26. *Bassin C., Laske G., Masters G.* The current limits of resolution for surface wave tomography in North America // EOS Trans AGU. 2000. Vol. 81. № 48. F897.
27. *Clinton J.F., Nettles M., Walter F., Anderson K., Dahl-Jensen T., Giardini D., Govoni A., Hanka W., Lasocki S., Lee W.S., McCormack D., Mykkelleit S., Stutzmann E., Tsuboi S.* Real-time geophysical data enhance Earth system monitoring in Greenland // EOS Trans AGU. 2014. Vol. 95. P. 13–24.
28. *Drachev S.S., Mazur S., Campbell S., Green C., Tishchenko A.* Crustal architecture of the East Siberian Arctic Shelf and adjacent Arctic Ocean constrained by seismic data and gravity modeling results // J. Geodynam. 2018. Vol. 119. P. 123–148.
29. *Dumitru T.A., Miller E.L., O’Sullivan P.B., Amato J.M., Hannula K.A., Calvert A.T., Gans P.B.* Cretaceous to Recent extension in the Bering Strait region, Alaska // Tectonics. 1995. Vol. 14. P. 549–563.
30. *Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary Reference Earth Model // Phys. Earth Planet. Interiors. 1981. Vol. 25. P. 297–356.
31. *Fujita K., Mackey K.G., McCaleb R.C., Gunbina L.V., Kovalev V.N., Imaev V.S., Smirnov V.N.* Seismicity of Chukotka, Northeastern Russia // GSA. Spec. Paper. 2002. Vol. 360. P. 259–272.
32. *Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G., Riegel S.A., Imaev V.S., McLean M.S.* Seismotectonics of the Chersky seismic belt, Eastern Russia (Yakutia) and Magadan district, Russia // Geology, Geophysics and Tectonics of Northeastern Russia: A tribute to Leonid Parfenov. Stephan Mueller Spec. Publ. 2009. Ser. 4. P. 117–145.
33. *Franke D., Hinz K., Reichert C.* Geology of the East Siberian Sea, Russian Arctic, from seismic images: structures, evolution, and implications for the evolution of the Arctic Ocean Basin // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. B07106.
34. *Franke D., Reichert C., Damm V., Piepjohn K.* The South Anyui suture, Northeast Arctic Russia, revealed by offshore seismic data // Norwegian J. Geol. 2008. Vol. 88. P. 189–200.
35. <http://www.globalcmt.org>. Global Centroid Moment Tensor Web Page. On-line Catalog. Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA, (Accessed November 10, 2019).
36. <http://www.isc.ac.uk>. International Seismological Centre. Internation. Seismol. Center, Thatcham, United Kingdom, (Accessed November 10, 2019).
37. <http://seismology.harvard.edu/resources.html>. Harvard University, Department of Earth and Planetary Sciences, (Accessed September–January 2015).
38. *Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M.* Structural-dynamic model of the Chersky seismotectonic zone (continental part of the Arctic–Asian seismic belt) // J. Asian Earth Sci. 2016. Vol. 116. P. 59–68.
39. *Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponier P., Gaudemer Y., Mostinsky A., Dailu R.* Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ($M_w = 5.2$) and 1995 July 21 Yongen ($M_w = 5.6$) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China) // Geophys. J. Int. 2001. Vol. 144. № 1. P. 206–220.
40. *Mackey K.G., Fujita K., Gunbina L.V., Kovalev V.N., Imaev V.S., Koz'min B.M., Imaeva L.P.* Seismicity of the Bering Strait region: Evidence for a Bering block // Geology. 1997. Vol. 25. P. 979–982.
41. *Mackey K.G., Fujita K., Hartse H.E., Stead R.J., Steck L.K., Gunbina L.V., Leyshuk N., Shibaev S.V., Koz'min B.M., Imaev V.S., Gordeev E.I., Chebrov V.N., Masal'ski O.K., Gileva N.A., Bormatov V.A., Voitenok A.A., Levin Y.N., Fokina T.A.* Seismicity map of Eastern Russia, 1960–2010 // Seismol. Res. Lett. 2010. Vol. 81. № 5. P. 761–768.
42. *Nakamura K., Plafker G., Jacob K.H., Davies J.N.* A tectonic stress trajectory map of Alaska using information from volcanoes and faults // Earthquake Res. Inst. Bull. 1980. Vol. 55. P. 89–100.
43. *Nataf H.-C., Ricard Y.* 3SMAC: On a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling // Phys. Earth Planet. Interiors. 1996. Vol. 95. P. 101–122.
44. *Natal'in B.A., Amato J.M., Toro J., Wright J.E.* Paleozoic rocks of Northern Chukotka Peninsula, Russian Far East: implications for the tectonics of the Arctic Region // Tectonics. 1999. Vol. 18. № 6. P. 977–1003.
45. *Nokleberg W.J., Parfenov L.M., Monger J.W.H., Norton I.O., Khanchuk A.I., Stone D.B., Scotese C.R., Scholl D.W., Fujita K.* Phanerozoic tectonic evolution of the Circum-North Pacific // U.S. Geol. Surv. 2000. Prof. Pap. 1626. 122 p.
46. *Piepjohn K., Franke D., Gaedicke C., Mrugalla S., Lorenz H., Brandes C., Von Gosen W., Labrousse L., Sobolev N.N., Solobev P., Tolmacheva T., Suan G., Talarico F.* Mesozoic structural evolution of the New Siberian Islands. In: *Circum-Arctic Lithosphere Evolution*, Ed. by V. Pease, B. Coakley // Geol. Soc. Spec. Publ., London. 2018. Vol. 460. № 1. P. 239–262.
47. *Prokopiev A.V., Ershova V.B., Anfinson O., Stockli D., Powell J., Khudoley A.K., Vasiliev D.A., Sobolev N.N., Petrov E.O.* Tectonics of the New Siberian Islands archipelago: Structural styles and lowtemperature thermochronology // J. Geodynam. 2018. Vol. 121. P. 155–184.
48. *Toro J., Amato J. M., Natal'in B.* Cretaceous deformation, Chegitun River area, Chukotka Peninsula, Russia: Implications for the tectonic evolution of the Bering Strait region // Tectonics. 2003. Vol. 22. № 3. № 1021. P. 5–19.

Seismotectonic Deformation of Active Segments of Conjugation Zone of Kolyma-Omolon Superterrane and South Anui Suture (South–East of Russia)

L. P. Imaeva^{a, *}, V. S. Imaev^{a, b}, A. I. Seredkina^{a, c}

^a*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, bld. 128 Lermontova str., 664033 Irkutsk, Russia*

^b*Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), bld. 33 Lenina prosp., 677007 Yakutsk, Russia*

^c*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, bld. 4 Kaluzhskoe highway, 108840 Moscow Region, Troitsk, Russia*

**e-mail: imaeva@crust.irk.ru*

Our seismotectonic studies were focused on active segments of the conjugation zone of the Kolyma-Omolon superterrane and the South Anui suture. The aim of our research is to identify features that show activation of the suture zones and to determine parameters of the stress-strain state of the crust in the study area. Analysis was based on average tensors of seismotectonic deformation, which were estimated for the main epicentral fields of the northeastern regions of Russia. New data is now available on focal characteristics of moderate earthquakes, which can improve determining the kinematic types of junctions of the suture zones of the tectonic taxa located along the Arctic and Pacific continental margins. Regimes of seismotectonic destruction of the crust are determined for the active segments of the conjugation zone of the Kolyma-Omolon superterrane and the South Anui suture. These regimes are influenced by global geodynamic processes taking place at the lithospheric plate margins, as well as by the dominant deformation fields of the adjacent tectonic taxa. The seismotectonic analysis results suggest activation of the suture zones of the northwestern flank of the Kolyma-Omolon superterrane under stable north-eastward compression. The suture zones may extend into the Laptev Sea area, wherein they conjugate with the structural elements of the South Anui suture (Novosibirsk–Svyatoy Nos segment). In the Anui-Chukotka segment of the suture, seismotectonic destruction of the crust changes from compression to extension. This change is due to the effect of deformation fields of active megazones of the conjugated tectonic taxa of the Novosibirsk-Chukotka nappe-fold and Okhotsk-Chukotka active margin areas. For the tectonic taxa of the Arctic sector of the northeastern regions of Russia, a database has been consolidated, including the parameters of seismotectonic deformation of the crust, which can be useful for various geodynamic reconstructions.

Keywords: Kolyma-Omolon superterrane, South Anui suture, suture zones, earthquake focal mechanisms, tensors of seismotectonic deformation, parameters of the stress-strain state of the crust