

**ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕВЕРО-ВОСТОКА КАМЧАТКИ И
СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ РЕГИОНА В 2013 Г.**

А.Г. Нурмухамедов¹, М.Д. Сидоров¹, В.В. Недядько²

¹ФГБУН «Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН» (НИГТЦ ДВО РАН) Северо-Восточное шоссе 30, а/я 56, г. Петропавловск-Камчатский, 683002; e-mail: nurmuxamedov1949@mail.ru

²Филиал АО «ВНИИГеофизика»–Центр «Геон», г. Москва

Поступила в редакцию 2 ноября 2017 г.

Проведен анализ результатов геофизических исследований земной коры и верхней мантии, реализованных в 2000–2013 гг. в районе Камчатского перешейка. На основе полученных данных выделена обдукция – надвиг субокеанической литосферы на краевую часть материковой. Полученные материалы указывают на потенциально высокую сейсмическую опасность всей фронтальной зоны обдукции. Разработана комплексная геолого-геофизическая модель по профилю, проходящему вдоль фронта обдукции между поселками Оссора и Тилички. В 2013 г. зарегистрирована мощная сейсмическая активизация на северо-востоке региона, начавшаяся Ильпырским землетрясением. Сопоставление результатов моделирования с сейсмическим линеamentом показывает, что вдоль разрывных нарушений между литосферными блоками происходит накопление тектонических напряжений с последующей их разрядкой в виде сейсмических событий, что и зафиксировано на участке обдукции между поселками Оссора и Тилички в марте–мае 2013 г.

Ключевые слова: фронт обдукции, разрывные нарушения, Ильпырское землетрясение, геолого-геофизическая модель, п-ов Камчатка.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с конца 70-х гг. прошлого столетия и по 2013 г., на территории Камчатского края, на основе долговременной программы [7, 10, 11] ПГО (ОАО) «Камчатгеология» осуществляло комплексные геолого-геофизические исследования земной коры и верхней мантии методами обменных волн землетрясений (МОВЗ) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ). С 2004 г. в работах приняли участие филиал АО «ВНИИГеофизика» – Центр «ГЕОН» (МОВЗ) и ООО «Северо-Запад» (МТЗ).

Постановка исследований обоснована необходимостью изучения особенностей строения земной коры и верхней мантии в регионе, характеризующемся широким развитием современного вулканизма и высокой сейсмичностью. Работы велись вдоль региональных профилей различного направления (рис. 1), пересекающих основные геологические структуры Корякско-Камчатской складчатой области. Самым протяженным является профиль, проложенный вдоль полуострова – от бухты Ходутка на юге до села Хаи-

лино на севере, состоящий из 6-и отдельных участков общей протяженностью 1300 км. Одним из таких участков является профиль п. Оссора–п. Тилички, проходящий вдоль восточного побережья Камчатского перешейка, в его северной половине (рис. 1, 2).

В целом территория Камчатского перешейка достаточно хорошо изучена – вся площадь покрыта геологической, гравиметрической и аэромагнитной съемками м-ба 1:200 000, а ее значительная часть – аэромагнитной съемкой м-ба 1:50 000. По материалам гравиметрической и геологической съемок составлены структурно-формационная (Апрелков С.Е., 1989) и тектоническая (Апрелков С.Е., 1994) карты м-ба 1:500 000, а позже – схема тектонического районирования [1]. Позднее на всю территорию Корякско-Камчатской складчатой области подготовлена тектоническая схема м-ба 1:1 000 000 (Нурмухамедов А.Г., 2010), которая затем в 2013 г. была дополнена результатами глубинных геофизических исследований. Составители схемы – по геологическим данным Лопатин А.Б. (Камчатнедра), Разумный А.В. (ОАО «Камчатгеология»), дополнение по геофизическим –

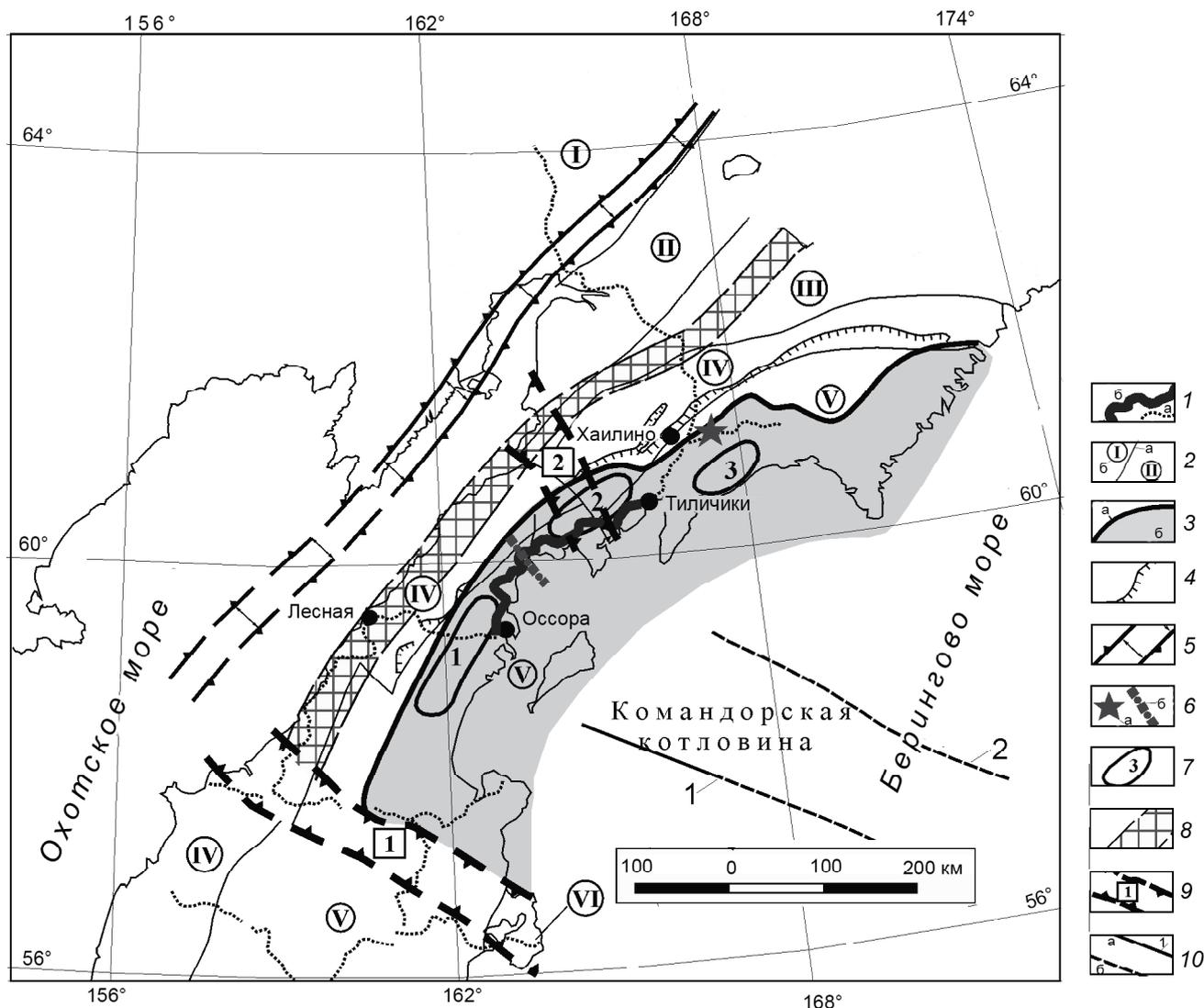


Рис. 1. Схема геотектонической реконструкции северо-восточной части Корякско-Камчатской складчатой области (по материалам [7–11, 15]).

1 – региональные геофизические профили (а), в том числе профиль п. Оссора–п. Тиличики (б); 2 – границы складчатых зон (а), обозначение зон (б) и их названия: I – Тайгоноско-Мургалская, II – Пенжинско-Анадырская, III – Корякская, IV – Корякско-Западно-Камчатская, V – Олюторско-Восточно-Камчатская, VI – Зона Восточных полуостровов; 3 – межплитная граница – фронт обдукции (а), фрагмент палеосубокеанической [6] обдуриванной плиты (б); 4 – Ирунейско-Ватынский надвиг [4]; 5 – предполагаемые границы Пенжинского палеорифта; б – эпицентр Олюторского землетрясения 2016 г. (а), линейная зона эпицентров землетрясений в период сейсмической активности в марте–мае 2013 г. (б); 7 – рудные районы и их названия: 1 – Северо-Камчатский, 2 – Ильпинский, 3 – Пылгинский; 8 – зона погружения «гранитной» [20] литосферы; 9 – зоны поперечных дислокаций и их названия: 1 – Паланско-Командорская – фрагмент границы между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами, 2 – Малетойваямская; 10 – новейшие разрывные нарушения, выделенные по морфологическим признакам (а – уверенные, б – предполагаемые) – линеаменты Гамма (1) и Дельта (2) [15].

Нурмухамедов А.Г. (ОАО «Камчатгеология»). Фрагмент Тектонической схемы представлен на рис. 2.

СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

В структурно-геологическом плане район, по которому проходит профиль п. Оссора–п. Тиличики,

расположен в пределах Олюторской подзоны Олюторско-Восточно-Камчатской складчатой зоны. Район пересекают разрывные (тектонические) нарушения преимущественно северо-западного (алеутско-командорского) направления. Заметное увеличение их количества и протяженности отмечается на юге Камчатского перешейка, где по геологическим данным выде-

лена Паланско-Командорская зона поперечных дислокаций (ЗПД) (врезка, рис. 2). По некоторым оценкам [11, 15] данную зону можно отнести к фрагменту трансформного разлома, отделяющего Северо-Американскую литосферную плиту от Евразийской. Здесь по данным МОВЗ [11] зафиксировано утонение земной коры (26–29 на фоне 35–40 км), имеющее четко выраженное северо-западное простирание. На севере Камчатского перешейка по геолого-геофизическим данным выделена Малетойваямская ЗПД (рис. 1, 2).

В процессе работ по созданию схемы сейсмотектонического районирования Корьяско-Камчатской складчатой области (Нурмухамедов А.Г., 2013) выделены оси зон повышенной сейсмичности (ОЗПС). В качестве основы приняты эпицентры сейсмических событий с магнитудой по коде СКД $M \geq 3.5$, произошедших на территории Камчатки за период инструментальных наблюдений с 1962 по 2013 гг. (здесь и далее информация по землетрясениям получена на сайте Камчатского филиала ЕГС РАН – <http://www.emsd.ru/ts/>). Отмечено, что значительная часть тектонических нарушений, и в первую очередь северо-западного простирания, совпадает с протяженными сейсмоактивными зонами, являясь, таким образом, современными динамически активными элементами литосферы. На рис. 2 показаны разрывные нарушения в районе Камчатского перешейка, совпадающие с осями зон коровой, коромантийной и верхнемантийной сейсмичности.

Обращает на себя внимание то, что часть тектонических нарушений алеутско-командорского направления в своем северо-западном продолжении не прослеживается дальше некой линии, протянувшейся вдоль центральной части Камчатского перешейка. По комплексу геолого-геофизических данных здесь выделен фронт обдукции – фронт надвига субокеанической литосферной плиты на краевую часть материковой [6–11]. Следует отметить, северо-восточная часть обдукцированной плиты во многом совпадает с «Олюторским поясом распространения террейнов», отмеченным в коллективной монографии [20].

За короткое историческое время на северо-востоке Камчатки произошли крупные сейсмические события – Хаилинское (1991 г.), Олюторское (2006 г.) и Ильпырское (2013 г.) землетрясения. Предполагается, что повышенная сейсмичность северо-западных окраин субокеанической (палеосубокеанической [6]) плиты является результатом унаследованно продолжающихся тектонических движений как в зоне палеообдукции в северо-западном направлении со стороны океана, так и в зоне палеосубдукции со стороны Пенжинского рифта в юго-восточном направлении [7–10].

На схеме (рис. 1) выделена зона погружения «гранитной» [20] литосферы – зона палеосубдукции. Зона сформировалась как область компенсации движения литосферы от Пенжинского рифта в сторону океана вследствие раскрытия рифта в поздней юре–раннем мелу [1]. Но здесь требуется пояснение.

Принято считать, что субдукционные процессы происходят только с океанической литосферой, потому что она (литосфера) ультраосновного и основного состава – то есть, тяжелая. Но литосфера,двигающаяся в юго-восточном направлении в результате раскрытия Пенжинского рифта по всем признакам относится к континентальному типу – то есть, относительно легкая. Почему же она погружалась (субдуцировалась), не будучи тяжелой? Здесь можно предположить, что краевая часть континентальной литосферы была «вынуждена» погружаться под влиянием встречного движения еще более легкой субокеанической литосферной плиты. Ее «легкость» обусловлена наличием значительной по мощности толщи осадочного чехла, которая на момент приведения обеих плит в соприкосновение составляла не менее 20 км [6].

В 2013 г. зарегистрирована мощная сейсмическая активизация на северо-востоке Камчатского региона, начавшаяся Ильпырским [14] землетрясением 13 марта ($K_s = 13.9$; $\max M_c = 6.3$; $M_L = 6.2$). До этого события данный район вполне можно было бы отнести к зоне сейсмического затишья. Во всяком случае, за период сейсмического мониторинга здесь не было отмечено сколь-либо значительных по масштабам сейсмических событий. Рой эпицентров узкой полосой (рис. 3 А) протянулся на 50 км в северо-западном направлении (аз. $\sim 320^\circ$), частично охватывая Карагинский залив и «проникая» в срединную часть Камчатского перешейка. Сейсмоактивный линеймент практически полностью совпадает с разрывным нарушением того же простирания (рис. 2) и его распространение в северо-западном направлении не прослеживается далее фронта обдукции. Вероятно, рой землетрясений является результатом разгрузки тектонических напряжений, накапливаемых в результате сдвиговых дислокаций вдоль разлома, разделяющих литосферные блоки.

В процессе анализа сейсмологических данных построен разрез (рис. 3 Б), где вдоль линеймента вынесены проекции гипоцентров землетрясений класса (K_s) от 8.7 до 13.9. На первый взгляд, выделяется три независимые группы гипоцентров в интервале глубин 1–7, 10–25 и 44–62 км. Но наиболее глубинная совокупность гипоцентров (в рис. 3 Б объединена пунктирной линией) образует некую единую фокальную зону, по форме напоминающую основание и фронт

обдукции. В разрезе стрелкой показано предполагаемое движение обдущиваемой литосферной плиты. В Карагинском заливе глубина до фокальной зоны составляет 76 км, ближе к береговой линии 50 км, а затем наблюдается довольно крутой ее подъем до глубины 10 км в районе Камчатского перешейка.

В районе перешейка наблюдается своеобразная расстыковка «стройной» конфигурации фокальной зоны. Амплитуда расстыковки составляет порядка 30 км. Именно в этом месте на глубине 20–25 км произошли наиболее мощные сейсмические события ($K_s = 12.1 \div 13.9$; $\max M_c = 6.3$). Эпицентры землетрясений находятся на минимальном удалении от профиля в районе пикетов 502–504.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые наблюдения МОВЗ выполнены по стандартной методике [12] при трехкомпонентной регистрации сейсмических волн. В среднем шаг наблюдений по профилю составил 4 км. Регистрация событий осуществлялась в режиме «по обнаружению». Продолжительность стоянки регистрирующей аппаратуры составляла не менее 30 суток, что обеспечивало необходимый набор информации для выделения границ обмена. Методика полевых наблюдений и интерпретации данных МОВЗ изложены в статье [11], там же представлены глубинные разрезы вдоль региональных профилей по всей территории Камчатки. На рис. 4 показан разрез МОВЗ по профилю п. Оссора–п. Тилички, совмещенный с двумерной геоэлектрической моделью, построенной по данным МТЗ.

Полевые наблюдения методом магнитотеллурического зондирования реализованы в модификациях

АМТЗ – аудиоманнитотеллурическое зондирование, МТЗ и ГМТЗ – глубинное МТ-зондирование. Методики различаются диапазоном регистрируемых частот МТ-поля ($400-1$, $400-10^{-3}$, $400-10^{-4}$ Гц) и продолжительностью его регистрации. Измерения ГМТЗ реализованы с шагом 20 км, МТЗ – 4 км, АМТЗ – 2 км. В модификации АМТЗ осуществлялась регистрация 4-х компонент поля (МТ-поля) – E_x , E_y , H_x , H_y , в МТЗ и ГМТЗ добавлялась регистрация пятой компоненты МТ-поля – H_z . Установка датчиков ориентировалась вдоль и вкrest береговой линии и основных структур региона – по азимутам 30° и 120° . Точки МТЗ и ГМТЗ совмещены с точками МОВЗ.

Анализ тензора импеданса показал, что на профиле п. Оссора–п. Тилички проявляются два типа неоднородностей. Первые – трехмерные. Они проявлены в среднечастотном диапазоне (1–30 с), преимущественно в южной части профиля и на его северном окончании. Вторые неоднородности – двумерные. Их проявление значительно слабее первых, и отмечаются они на протяжении всего профиля на периодах МТ-поля более 100 с. По всей видимости, они отражают влияние «берегового эффекта». Анализ полученных материалов показал, что возможна 2D-инверсия МТ-данных, но необходимо учитывать влияние 3D-неоднородностей. Для их учета была рассчитана 3D-геоэлектрическая модель Камчатки, где ее строение представлено набором геоэлектрических блоков с постоянным значением сопротивления. Комбинация блоков (элементов модели) аппроксимирует различные геологические структуры – осадочные бассейны, впадины, зоны разломов, глубинные проводящие структуры и т.д. Детальное описание методики 3D-моделирования представлено в рабо-

Рис. 2. Фрагмент тектонической схемы Корьякско-Камчатской складчатой области.

Структурные ярусы: 1 – плиоцен-четвертичный, 2 – верхнекайнозойский, 3 – среднекайнозойский, 4 – верхнемезозой-нижнекайнозойский и его подъярусы – нижнекайнозойский (а) и верхнемезозойский (б), 5 – среднемезозойский; 6 – интрузивные образования состава: преимущественно среднего и кислого (а), основного-ультраосновного (б); 7 – вулканогенные образования состава: основного (а), кислого (б), среднего (в); 8 – меланж полимиктовый; складчатые зоны: 9 – Пенжинско-Анадырская, 10 – Корьякско-Западно-Камчатская, 11 – Олюторско-Восточно-Камчатская (Олюторская подзона); 12 – структуры складчатых зон и их обозначения: ЛС – Лесновское поднятие, ВТ – Ватынский покров, ВВ – Вывенское поднятие; 13 – Ильпинско-Литкенский наложенный прогиб; 14 – межгорные прогибы и грабены: ПР – Парапольский, ТЛ – Талалаевский; 15 – формирующиеся плиоцен-голоценовые впадины: Вв – Вывенская, Лт – Литкенская, Кл – Куольская, Рк – Рекинникская; островодужные вулканические зоны: 16 – Корьякско-Западно-Камчатская, 17 – Центрально-Камчатская; 18 – вулканотектонические структуры и их названия: Вт – Ватапваямская, Сн – Сановаямская, Эр – Эруваямская, Вн – Ваняваямская, Вв – Ветроваямская, Ср – Сеэрваямская, Кв – Каванейваямская, Мл – Малотойваямская, Вр – Вироваямская, Ич – Ичигинская, Мг – Мигитунупская; 19 – разрывные нарушения: главные, выходящие на дневную поверхность (а), перекрытые вышележащими образованиями (б), выделенные по геофизическим данным (в); 20 – Ирунейско-Ватынский надвиг; 21 – границы Малотойваямской зоны поперечных дислокаций; 22 – прочие границы; структуры, выделенные по данным региональной геофизики: 23 – фрагмент Центрально-Камчатской глубинной шовной зоны – зоны приращения островодужных блоков (палеодуг) в верхнем палеоцене–эоцене [15, 22] к складчатой зоне Палеокамчатки, 24 – зона погружения «гранитной» [20] литосферы, 25 – фронт обдукции; 26 – фрагмент очаговой области Олюторского землетрясения 2006 г. [5]; 27 – оси зон повышенной сейсмичности (ОЗПС): коровой (а), коромантийной (б), мантийной (в), новейшей (март–май 2013 г. [$\max K_s = 13.9$; $M_c = 6.3$; $M_L = 6.2$]) коромантийной (г); 28 – региональные геофизические профили (1-1 – п. Лесная–п. Оссора, 2-2 – п. Оссора–п. Тилички), пункты наблюдений МОВЗ-МТЗ и их номера.

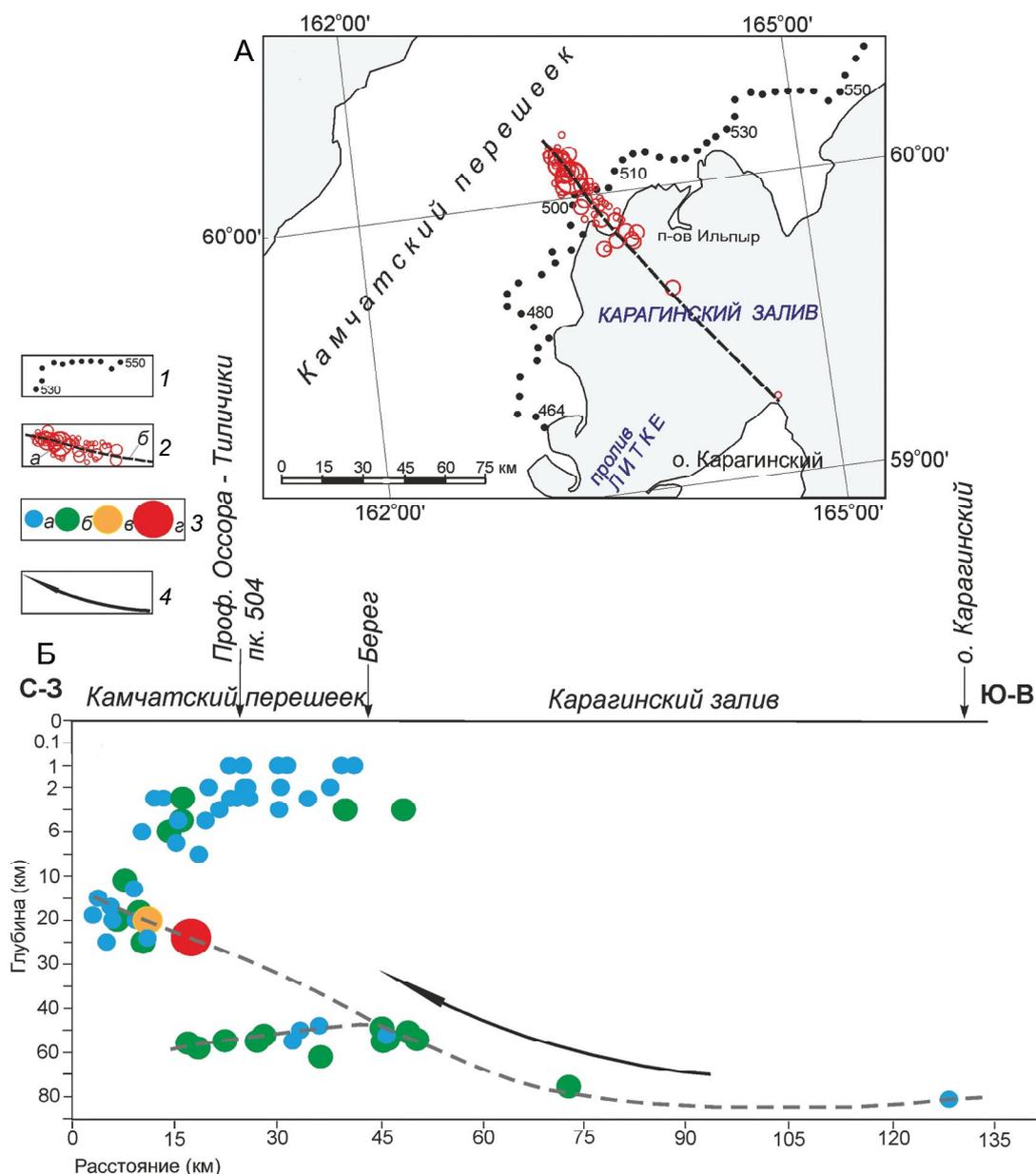


Рис. 3. Схема расположения эпицентров землетрясений, произошедших на северо-востоке Камчатского перешейка и в Карагинском заливе в период с 13.03.2013 по 29.05.2016 г. (А), распределение гипоцентров землетрясений вдоль сейсмического линеймента (Б).

1 – точки наблюдения МОВЗ-МТЗ на профиле п. Оссора–п. Тилички и их номера; 2 – эпицентры землетрясений (а), сейсмический линеймент (б); 3 – гипоцентры землетрясений энергетических классов (K_S): 8.7–9.5 (а), 9.6–12 (б), 12.9 (в), 13.9 ($M_L = 6.2$, $M_C = 6.3$) (г); 4 – направление движения субокеанической литосферной плиты.

тах [2, 3]. На заключительном этапе для построения итоговой геоэлектрической модели производилась 2D-инверсия по программе [23]. Стартовая модель создавалась на основе трехмерной модели – подбирались однородные по сопротивлению блоки, выделенные в полосе профиля п. Оссора – п. Тилички. В верхней части разреза, где по результатам анализа магнитотеллурические данные отвечают одномерной

модели, сопротивление блоков задавалось по результатам 1D-инверсии. Использованный подход позволил получить наиболее детальную и достоверную геоэлектрическую модель вдоль профиля п. Оссора – п. Тилички (рис. 4). Обработка данных МТЗ и построение 2D-геоэлектрической модели выполнены ведущим геофизиком ООО «Северо-Запад» (г. Москва) Е.Д. Александровой.

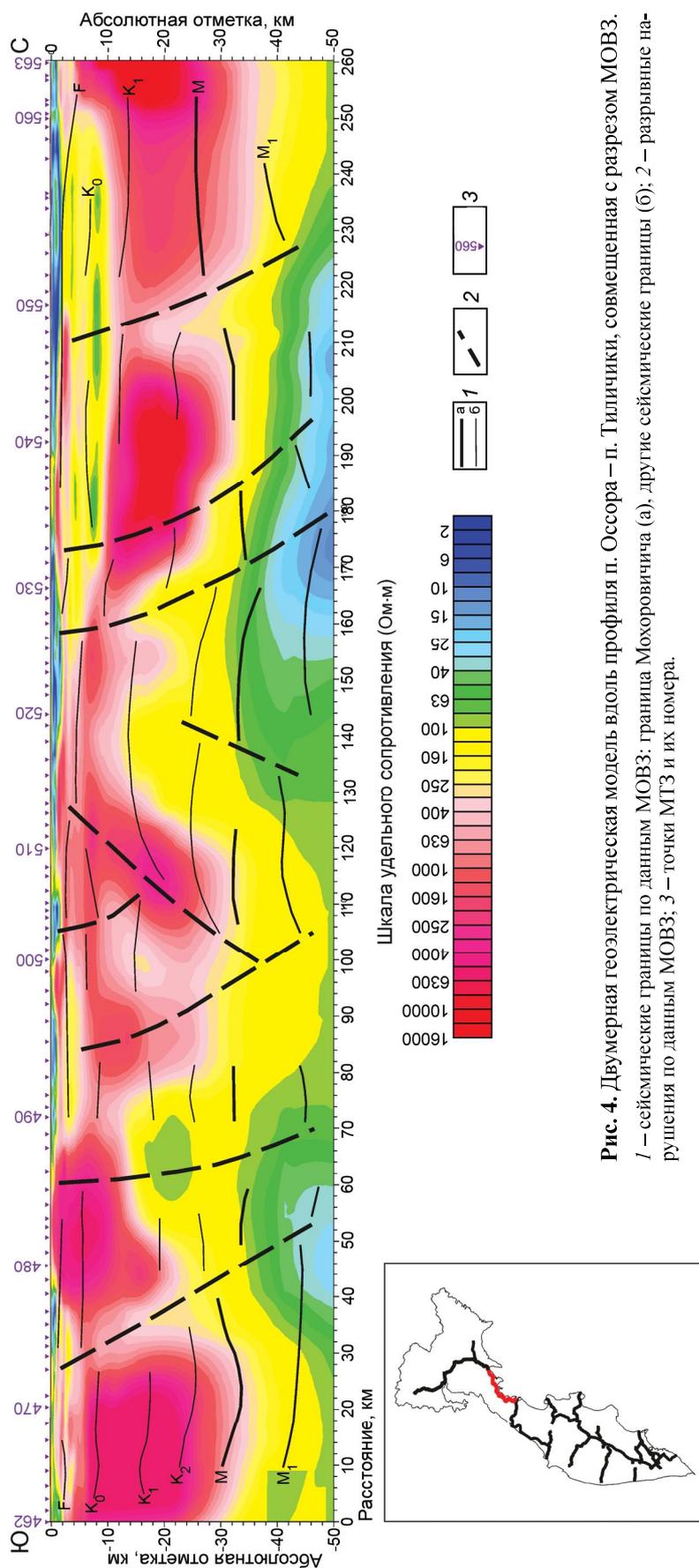


Рис. 4. Двумерная геоэлектрическая модель вдоль профиля п. Оссо́ра – п. Тиличи́ки, совмещенная с разрезом МОВЗ. 1 – сейсмические границы по данным МОВЗ: граница Моховичича (а), другие сейсмические границы (б); 2 – разрывные нарушения по данным МОВЗ; 3 – точки МГЗ и их номера.

С целью изучения распределения плотности пород в земной коре и верхней мантии выполнено слоисто-блоковое плотностное 2D-моделирование с использованием материалов гравиметрической съемки м-ба 1:200 000. Своеобразным каркасом модели послужили границы и разрывные нарушения, выделенные по данным МОВЗ. Априорные значения плотности верхних слоев устанавливались по геологическим образованиям, выходящим на дневную поверхность. Для глубинных слоев значения плотности взяты из опубликованных источников [19]. Так, для верхнемеловых отложений значение плотности принято равным 2.67 г/см^3 , для магматометаморфического («гранитного») слоя $2.64\text{--}2.8 \text{ г/см}^3$, для нижней коры («базальтового» слоя) $2.80\text{--}3.07 \text{ г/см}^3$ и для верхней мантии, примерно, 3.30 г/см^3 . Указанные плотности приняты в качестве исходных данных для начальных итераций. Методика моделирования изложена в статьях [16–18]. Результаты моделирования (рис. 5) подтверждают принятую идентификацию выделенных по данным МОВЗ слоев литосферы на непротиворечивость сложившимся представлениям о ее плотностных характеристиках.

В результате комплексной интерпретации исходных данных подготовлена глубинная геолого-геофизическая модель вдоль профиля п. Оссора–п. Тилички (рис. 6). Над моделью показаны границы основных геологических структур, пересекаемых профилем (рис. 2) и вулканотектонические структуры (ВТС), вблизи которых он проходит. В модели выделены разделы: Мохоровичича (индекс М), нижняя кора – верхняя кора (Конрада? – K_2), кровли консолидированной коры – кристаллического фундамента (K_0) и верхнемелового комплекса пород (F), другие границы литосферы, а также коровые и коромантийные разрывные нарушения. Различной штриховкой и крапом в модели отмечены геоэлектрические и плотностные неоднородности. На плоскость модели вынесены проекции гипоцентров наиболее сильных сейсмических событий, произошедших в марте–мае 2013 г. в диапазоне широт $59^\circ 52.8'\text{--}60^\circ 13.2'$. Подробные пояснения к модели представлены в условных обозначениях к рисунку 6.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В соответствии с разработанной моделью мощность земной коры вдоль профиля варьирует в довольно широких пределах – от 26 км в его северной части до 32–34 км в центральной. Мощность верхней коры («гранитного» слоя) меняется от 13–15 км до 25 км, нижней коры («базальтового» слоя) – от 8–12 км по краям модели до 20 км в ее срединной части. В соответствии с результатами геолого-геофизических ис-

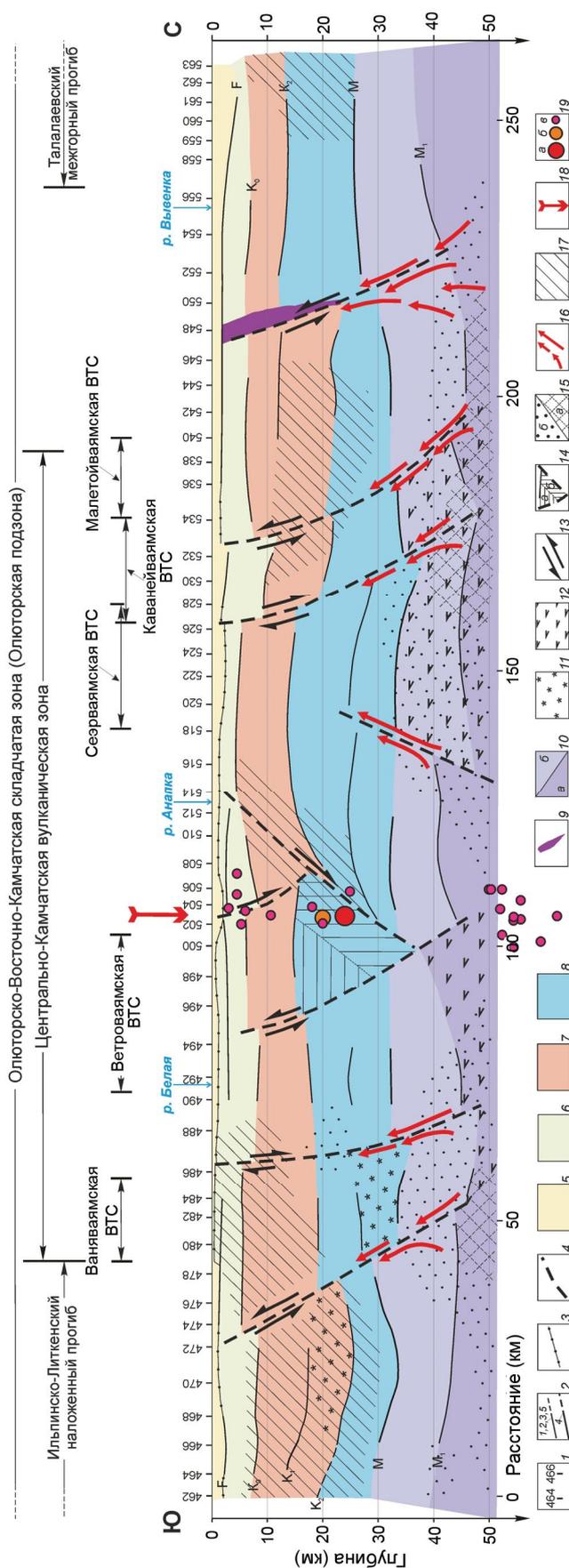
следований по профилю п. Лесная–п. Оссора данный тип земной коры отнесен к палеосубокеаническому типу [6].

Граница М, как и все остальные разделы литосферы, выделяется фрагментарно и часто со сдвигом вдоль разломов. В верхней мантии, ниже границы М, выделена граница M_1 . Предполагается, что между данными разделами заключен слой литосферной мантии обдуцированной литосферной плиты, а ниже границы M_1 находится литосферная мантия континентальной плиты [6, 11]. В нижней части модели, на глубине 35–50 км выделены участки (тт. 484–500, 516–563) с высоким значением плотности – $3.4\text{--}3.46 \text{ г/см}^3$. Предполагается, что это участки развития эклогитов, образовавшихся на границе литосферных плит в результате обдукции субокеанической плиты на краевую часть материковой. Описание взаимодействия литосферных плит в форме обдукции на примере геолого-геофизической модели по профилю п. Лесная–п. Оссора и других данных представлено в статьях [6–9, 11] и в работе [10].

Анализ геолого-геофизической модели указывает на разнообразие коровых и коромантийных разломов, образующих границы блоков. В разрезе уверенно просматриваются значительные по масштабам сдвиговые дислокации. На рис. 6 черными стрелками показано направление относительного смещения литосферных блоков. Судя по положению основных разделов литосферы, амплитуда дислокаций достигает 2–5 км и более. Столь сложное блоковое строение земной коры и верхней мантии можно объяснить близостью района прохождения профиля к наиболее разрушенной фронтальной части обдуцированной плиты. Необходимо отметить, что близкие по характеру разрывных нарушений разрезы МОВЗ отмечены и вдоль южного фрагмента профиля п. Корф–п. Верх. Пенжино, и вдоль профиля п. Хаилино–р. Пахача [11]. Эти профили также проходят вблизи фронта обдукции.

И в верхней, и в нижней коре выделяются участки с аномально высоким уровнем удельного сопротивления ($4\ 000\text{--}10\ 000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и более). Их наличие объясняется проявлением регионального метаморфизма, который сопровождал процесс обдукции. Вероятно, мощные тепловые потоки вдоль глубинных разломов способствовали его развитию.

В соответствии с разработанной моделью самые глубинные гипоцентры землетрясений сконцентрированы в верхней мантии континентальной плиты на глубине 50–60 км. Самая верхняя группа гипоцентров зарегистрирована в интервале глубин $\sim 2\text{--}6 \text{ км}$ – в мезозойской толще пород. Наиболее мощные сейсмические толчки с магнитудой (M_L) 5.7 и 6.2 произошли в



нижней коре – в «базальтовом» слое на глубине 20 и 24 км, соответственно.

Гипоцентры землетрясений примыкают к разрывным нарушениям различных наклонов. Разломы делят земную кору и верхнюю мантию на отдельные блоки сложной конфигурации. В блоке треугольной формы (тт. 494–514), вершина которого направлена вниз, выделены две зоны, характеризующиеся различной плотностью – 2.90 и 2.94 г/см³. Гипоцентры наиболее сильных толчков спроецированы на относительно незначительный по масштабам блок, где отмечена более высокая плотность (2.94 г/см³), которая примыкает к области с аномально высоким уровнем удельного сопротивления (4000–8000 Ом·м). К этому следует добавить, что анализ глубинного строения земной коры в районе Олюторского землетрясения (Нурмухамедов А.Г., 2010, 2013) говорит о том, что наиболее мощные сейсмические толчки происходили на границе сред, контрастно отличающихся по своим физическими характеристикам – удельному сопротивлению, плотности и т.д.

Сложное тектоническое строение участка земной коры по профилю п. Оссора–п. Тилички

Рис. 6. Геолого-геофизическая модель вдоль профиля п. Оссора–п. Тилички.

1 – пункты наблюдения МОВЗ-МТЗ и их номера; 2 – границы обмена по данным МОВЗ, отождествляемые: 1 – с кровлей верхнемелового комплекса пород (F), 2 – с кровлей консолидированной земной коры (K₁) – кристаллического фундамента, 3 – с границей Конрада (K₂), 4 – с границей Мохоровичича (M), 5 – с прочими сейсмическими границами в земной коре и верхней мантии; 3 – кровля верхнемелового комплекса пород по данным МТЗ; 4 – разрывные нарушения по данным МОВЗ; 5 – кайнозойский осадочный, вулканогенно-осадочный чехол; 6 – промежуточный комплекс пород – нижне-верхнемеловой ($\sigma = 2.4\text{--}2.55$ г/см³); 7 – домеловой магмаметаморфический («гранитный») слой ($\sigma = 2.6\text{--}2.8$ г/см³, $V_{пл} = 5.9\text{--}7.1$ км/с); 8 – «базальтовый» слой ($\sigma = 2.76\text{--}3.0$ г/см³, $V_{пл} = 6.8\text{--}7.5$ км/с); 9 – интрузия диоритового состава; 10 – верхняя литосферная мантия континентальной (а) и обдуцированной (б) плит; 11 – участки разуплотнения в верхней (2.8 на фоне 2.81–2.96 г/см³) и нижней (2.9 на фоне 2.91–2.96 г/см³) частях земной коры; 12 – участки высокой плотности ($\sigma = 3.4\text{--}3.46$ г/см³) в верхней мантии, предположительно эклогитового состава; 13 – направление относительного смещения литосферных блоков вдоль коровых и коромантийных разломов; 14 – блок земной коры с участками различной плотности: 2.90 г/см³ (а) и 2.94 г/см³ (б); 15 – аномально низкоомные зоны – предполагаемые области плавления, частичного плавления (а) и циркуляции высокоминерализованных флюидов (б); 16 – предполагаемые тепловые потоки; 17 – аномально высокоомные объекты (4000–10000 Ом·м и более), выделенные в земной коре по данным МТЗ; 18 – район пересечения профиля с сейсмическим линейamentом (сейсмические события марта–мая 2013 г.); 19 – проекции гипоцентров наиболее сильных сейсмических событий на плоскость разреза: K_s = 13.9 (M_L = 6.2, M_C = 6.3) (а); K_s = 12.9 (M_L = 5.7, M_C = 5.1) (б); K_s = 9.6–12 (в).

(тт. 500–508) указывает на возможность накопления тектонического напряжения уже по прошествии сейсмических событий 2013 г. Примером может служить район Олюторского разрушительного землетрясения 2006 г., где повторные измерения МОВЗ, выполненные после землетрясения – в 2009 г., показывают, что в среде снова происходит накопление тектонических напряжений в двух стабильных очагах, где вероятна разрядка в виде сильного землетрясения [13].

В монографии [15] отмечена тенденция «... к концентрации сильнейших сейсмических событий к областям сочленения крупнейших сдвиговых зон западного окончания Алеутской дуги с континентальным склоном Восточной Камчатки». Эта же тенденция прослеживается и по западному обрамлению Командорской котловины, в которой выделены новейшие разрывные нарушения – транскомандорские линеаменты Гамма и Дельта (рис. 1) северо-западного простирания. Отмечается повышенная концентрация эпицентров землетрясений на западных окончаниях указанных линеаментов. И хотя сильнейшие землетрясения с энергетическим классом порядка 14 и выше за период инструментальных наблюдений здесь не зафиксированы, как замечает автор монографии, протяженность упомянутых структур вполне достаточна для подготовки таких землетрясений.

Сейсмические события, произошедшие в марте–мае 2013 г., в определенной степени подтверждают это предвидение. В зоне, где до последнего времени наблюдается длительное сейсмическое затишье, зафиксирован рой землетрясений протяженностью 50 км, а с учетом отдельных гипоцентров протяженность всего сейсмического линеамента составляет более 100 км (рис. 3). Данный рой расположен между условным продолжением линеаментов Гамма и Дельта (рис. 1). Эпицентр наиболее сильного толчка ($M_c - 6.3$; 13.03.2013, 03:12:52.92) зарегистрирован в северо-западной части указанного роя. Значение его энергетического класса (K_s) довольно высокое и составляет 13,9. Вероятно, возможны более мощные сейсмические события.

ВЫВОДЫ

Глубинные разломы, выделенные в геолого-геофизической модели по профилю пп. Оссора – Тилички, входят в систему разрывных нарушений, расположенных во фронтальной части обдукции, подверженной наибольшему разрушению в процессе надвигания субокеанической литосферы на краевую часть материковой. Комплексный анализ геолого-геофизических данных показывает, что нарушения имеют преимущественно северо-западное – алеутско-командорское направление (в юго-западной части обдукции!). Часть

из этих нарушений в своем северо-западном продолжении ограничена линией фронта обдукции. Наиболее активная фаза обдукции завершилась в эоцене, но остаточные движения, вероятно, проявляют себя и в настоящее время. Свидетельством этому являются сейсмические события марта–мая 2013 г., а также разрушительные Хаилинское и Олюторское землетрясения, произошедшие в северо-восточной части обдукции в 1991 и 2006 гг. Вдоль разрывных нарушений между конкурирующими литосферными блоками происходит накопление тектонических напряжений с последующей их разрядкой в виде сейсмических событий, что и зафиксировано на участке обдукции между п. Оссора и п. Тилички в марте–мае 2013 года.

Сейсмический линеамент (март–май 2013) полностью совпадает с разрывным нарушением северо-западного простирания (рис. 2). Но, очевидно, накопление тектонических напряжений с последующей их разрядкой может произойти и в зоне других разломов алеутско-командорского направления.

В заключение следует отметить: анализ данных, накопленных за последние годы, включая материалы научных публикаций [6–10, 13–15 и др.] и результатов работ по созданию схемы сеймотектонического районирования Корякско-Камчатской складчатой области (Нурмухамедов А.Г., 2013) указывает на потенциально высокую сейсмическую опасность всей фронтальной зоны обдукции (рис. 1) на северо-востоке Камчатского региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апрельков С.Е., Декина Г.И., Попруженко С.В. Особенности геологического строения Корякского нагорья и бассейна реки Пенжины // Тихоокеан. геология. 1997. Т. 16, № 2. С. 46–57.
2. Белявский В.В., Алексанова Е.Д. Трехмерная геоэлектрическая модель южной части полуострова Камчатка // Физика Земли. 2014. Т. 50, № 1. С. 9–31.
3. Белявский В.В., Яковлев А.Г. Профильная 3D-инверсия данных МТЗ-МВЗ на примере Шивелучской вулканической зоны полуострова Камчатка // Физика Земли. 2016. Т. 52, № 1. С. 57–77.
4. Геологическая карта и карта полезных ископаемых Камчатской области и Корякского автономного округа 1:1 500 000 / Под ред. А.Ф. Литвинова, Б.А. Марковского, В.П. Зайцева. СПб.: ВСЕГЕИ, 2005.
5. Левина В.И., Ландер А.В., Иванова Е.И. Сейсмичность очага Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г. // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: Тр. регион. науч.-техн. конф. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 184–188.
6. Мишин В.В., Нурмухамедов А.Г., Белоусов С.П. Палеосубокеанический тип земной коры на северо-востоке Камчатки // Тихоокеан. геология. 2003. Т. 22, № 5. С. 58–72.

7. Нурмухамедов А.Г. Результаты интерпретации глубинных геофизических исследований, проведенных в районе Камчатского перешейка и материковой части Камчатского края в свете сейсмической активности в Олюторском районе // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: Тр. регион. науч.-техн. конф. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 194–199.
8. Нурмухамедов А.Г., Мороз Ю.Ф. Особенности геологического строения северо-восточной части Корякско-Камчатской складчатой области по данным глубинных геофизических исследований // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. Вып. 11. № 1. С. 125–133.
9. Нурмухамедов А.Г., Мороз Ю.Ф. Глубинное строение северо-восточной части Корякско-Камчатской складчатой области по данным региональных геофизических исследований // Геофиз. журн. 2009. Т. 31, № 3. С. 74–83.
10. Нурмухамедов А.Г. Глубинное строение северо-восточной части Корякско-Камчатской складчатой области по геофизическим данным: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Иркутск: ИЗК, 2010. 17 с.
11. Нурмухамедов А.Г., Неядько В.В., Ракитов В.А., Липатев М.С. Границы литосферы на Камчатке по данным метода обменных волн землетрясений // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. Вып. 29. № 1. С. 35–52.
12. Померанцева И.В., Мозженко А.Н. Сейсмические исследования с аппаратурой «Земля». М.: Недра, 1977. 256 с.
13. Попова О.Г., Неядько В.В., Липатев М.С., Нурмухамедов В.В. Возможность оценки напряженного состояния среды при профильных наблюдениях МОВЗ на примере материала, полученного в районе Олюторского землетрясения 2006 г. на Камчатке // Структура, свойства, динамика и минералогия литосферы Восточно-Европейской платформы: Материалы XVI Междунар. конф. / Ред. Н.М. Чернышов, А.А. Маловичко. Воронеж: ВГУ, 2010. Т. 2. С. 149–153.
14. Салтыков В.А., Дроздина С.Я. Ильпирское землетрясение 13 марта 2013 г. $M_w = 5.8$ (Северная Камчатка): аномальная протяженность очаговой зоны как артефакт // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. Вып. 24. № 2. С. 130–136.
15. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2009. 191 с.
16. Сидоров М.Д. Картирование мезозойского фундамента Авачинско-Корякской группы вулканов (Камчатка) методом плотностного моделирования // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4–5. С. 99–105.
17. Сидоров М.Д., Новаков Р.М. Плотностная модель зоны сочленения Камчатской и Алеутской островных дуг // Региональная геология и металлогения. 2014. № 58. С. 59–65.
18. Сидоров М.Д. Плотностное моделирование магматических структур в Колпаковском перспективном никеленосном районе (Срединный массив, Камчатка) // Тихоокеан. геология. 2015. Т. 34, № 3. С. 31–41.
19. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справ. геофизика / Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.
20. Ханчук А.И., Григорьев В.Н., Голозубов В.В., Говоров Г.И., Крылов К.А., Курносов В.Б., Панченко И.В., Пральникова И.Е., Чудаев О.В. Куюльский офиолитовый террейн. Владивосток: Изд-во ДВГИ ДВО АН СССР, 1990. 108 с.
21. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Обдукция // Геотектоника с основами геодинамики. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. С. 161–167.
22. Шапиро М.Н., Соловьев А.В. Кинематическая модель формирования Олюторско-Камчатской складчатой области // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 8. С. 863–880.
23. Rodi W., Mackie R.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // Geophysics. 2001. V. 66. P. 174–187.

Рекомендована к печати В.Г. Быковым

A.G. Nurmukhamedov, M.D. Sidorov, V.V. Nedyad'ko

Geological-geophysical model of northeastern Kamchatka with a reference to a seismic activity of the region in 2013

The results of the geophysical studies of the Earth crust and upper mantle carried out in 2000-2013 in the area of the Isthmus of Kamchatka were analyzed. On basis of the data obtained the obduction – the thrust of the sub-oceanic lithosphere onto the marginal part of the continental lithosphere was marked. The obtained materials indicate a potentially high seismic hazard of the entire frontal zone of the obduction. A complex geological and geophysical model was developed along the profile passing along the obduction front between Ossora and Tilichiki villages. In 2013 a powerful seismic activity in the northeast of the region was registered. This activation began with the Il'p'yr earthquake. The comparison of the simulation results with the seismic lineament shows that along the fractures between lithospheric blocks there is a tectonic stress accumulation with their further discharge as seismic events. It was recorded at the site of the obduction between the Ossora and Tilichiki villages in March-May, 2013.

Key words: obduction front, fractures, Il'p'yr earthquake, geological-geophysical model, Kamchatka Peninsula.