

МЕЖПЛИТНЫЕ ГРАНИЦЫ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА РОССИИ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ GPS ИЗМЕРЕНИЙ, СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ
И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В.Ю. Тимофеев¹, Д.Г. Ардюков¹, В.М. Соловьев², С.В. Шибаетов³, А.Ф. Петров³,
П.Ю. Горнов⁴, Н.В. Шестаков^{5,6}, Е.В. Бойко¹, А.В. Тимофеев¹

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

² Геофизическая служба СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

³ Якутский филиал Геофизической службы СО РАН, 677980, Якутск, просп. Ленина, 39, Россия

⁴ Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, Россия

⁵ Kwangwoon University, Seoul, South Korea

⁶ Институт прикладной математики ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Радио, 7, Россия

Рассматривается современная геодинамическая обстановка для Дальневосточного региона России, где сходятся три большие тектонические плиты — Евразийская, Северо-Американская и Тихоокеанская, а также несколько микроплит — Охотоморская, Берингоморская и Амурская. Приведен анализ имеющихся данных о положении межплитных границ и полюсов взаимного вращения плит, о сейсмичности региона. Представлены параметры моделей плитных движений для Северо-Востока России. Анализируется глубинное строение региона с использованием данных, полученных различными геофизическими методами. По профилю г. Магадан—о. Врангеля приводятся результаты, полученные методами ГСЗ, ОГТ и КМПВ.

Тектонические плиты, границы плит, метод космической геодезии, сейсмологический и сейсмический методы изучения глубинного строения земной коры.

PLATE BOUNDARIES IN THE FAR EAST REGION OF RUSSIA
(from GPS measurement, seismic-prospecting, and seismological data)

V.Yu. Timofeev, D.G. Ardyukov, V.M. Solov'ev, S.V. Shibaev, A.F. Petrov, P.Yu. Gornov,
N.V. Shestakov, E.V. Boiko, and A.V. Timofeev

The recent geodynamics of the Far East region of Russia is considered, where three large tectonic plates converge — Eurasian, North American, and Pacific, as well as several microplates—Okhotsk, Bering, and Amurian — have been hypothesized to exist. The available data on the position of the plate boundaries, the relative plate rotation poles, and the regional seismicity were analyzed, and parameters of plate motion models for northeastern Russia were determined in this study. The regional deep structure was investigated, using data obtained by different geophysical methods. The results of observations of the Magadan–Vrangel Island profile by deep seismic sounding (DSS), common-depth point (CDP) method, and correlation refraction method (CRM) are presented.

Tectonic plates; plate boundaries; space geodesy method; seismological and seismic methods for investigating the deep structure of the Earth's crust

ВВЕДЕНИЕ

Современная геодинамика и сейсмичность Дальневосточного региона в значительной мере определяется взаимодействием Евразийской, Тихоокеанской, Северо-Американской, а также меньших по размерам Амурской, Охотоморской плит и, возможно, Берингоморской. Для трех последних плит конфигурация и положение границ являются предметом активного изучения. Рассматривая вопрос о положении межплитных границ, остановимся на известных признаках границ. К ним относятся геологические

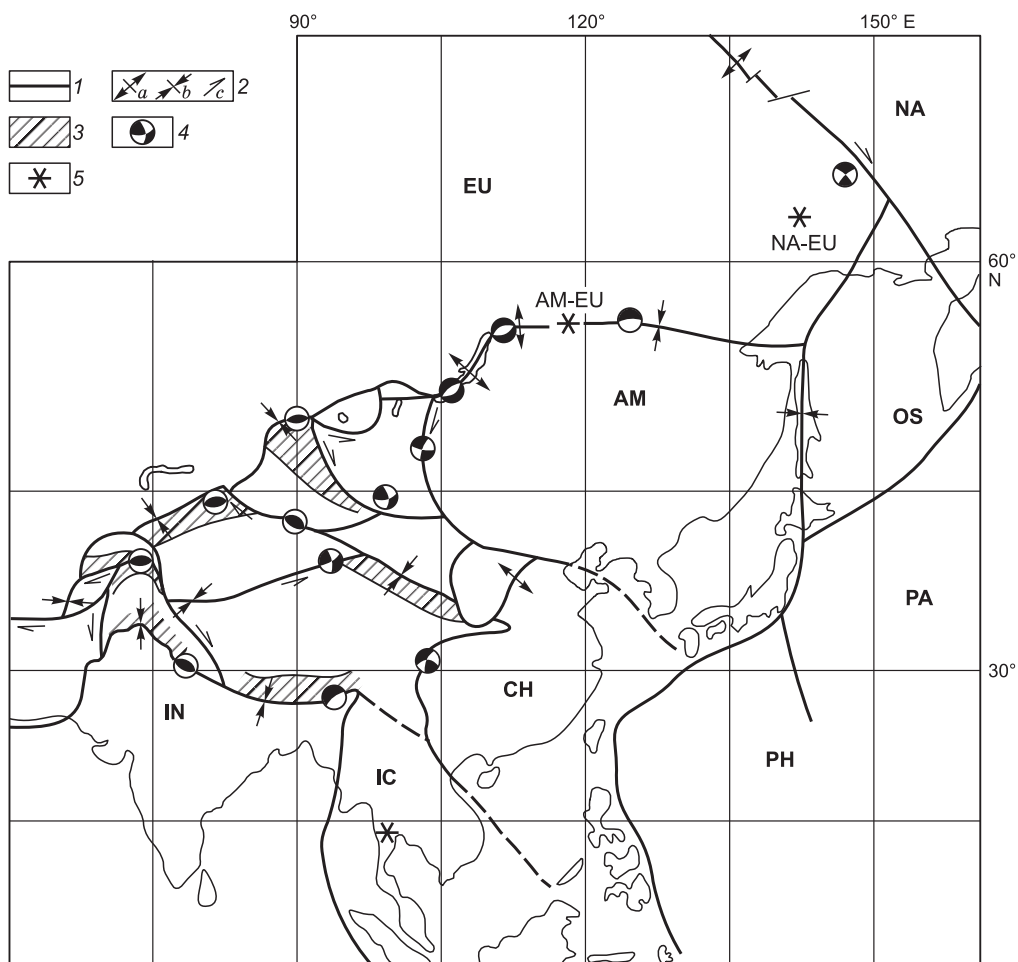


Рис. 1. Литосферные плиты и микроплиты (блоки) Внутренней Азии [Zonenshain, Savostin, 1981].

1 — границы плит и микроплит (блоков); 2 — направление относительного смещения вдоль границ: *a* — растяжение, *b* — сжатие, *c* — сдвиг; 3 — зоны сжатия и пластической деформации; 4 — тип фокального механизма землетрясений; 5 — положение полюса относительного вращения. Плиты: NA — Северо-Американская, EU — Евразийская, AM — Амурская, OS — Охотоморская, IN — Индийская, IC — Индо-Китайская, CH — Китайская, PH — Филиппинская, PA — Тихоокеанская.

кие (конфигурация, палеонтологическая информация, особенности разломных структур), распределение возраста пород, полосовых магнитных аномалий и теплового потока, «молодой» базальтовый вулканизм, особенности глубинной структуры и рельефа, сейсмичность. Этот подход можно проиллюстрировать известной схемой Л.П. Зоненшайна и Л.Л. Савостина [Zonenshain, Savostin, 1981] для плит Азии (рис. 1), при этом определяются только параметры относительного вращения плит, например Амурской плиты относительно Евразийской или Северо-Американской относительно Евразийской (положение полюса Эйлера: 56.95° с.ш., 117.46° в.д. и 61.94° с.ш., 143.1° в.д., при скорости $1 \cdot 10^{-7}$ град./год и $2.5 \cdot 10^{-7}$ град./год). Новые факты получены с помощью активно развивающихся в последние десятилетия методов космической геодезии. Они позволяют определять параметры современного вращения плит и выделять отдельные «твердые» плиты на сфере. Методы космической геодезии применяются для изучения территории последние 15 лет с использованием постоянных станций и сетевых методов. Сейсмологические исследования в регионе проводятся с середины прошлого века, когда начали развиваться сети специальных станций. Характер сейсмичности Северо-Восточного региона России в целом отражает особенности напряженного состояния на границах тектонических плит. Проводимые в последние годы глубинные сейсмические исследования и измерения методом GPS позволяют прояснить связь плитных смещений и глубинной структуры региона Дальнего Востока. Геофизические и профильные сейсмические измерения методами ОГТ, ГСЗ и т.д. проводятся в регионе начиная со второй половины прошлого столетия. В статье рассматриваются результаты, полученные по профилю г. Магадан—о. Врангеля в последнее десятилетие. Задача работы — определение характеристик межплитных границ на основе современных сейсмических, сейсмологических и геодезических данных.

СЕЙСМИЧНОСТЬ ПОГРАНИЧНЫХ ЗОН ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ АЗИИ

Значительная часть северо-востока Азии подвержена воздействию сильных землетрясений, тяготеющих к неотектоническим структурам, которые формируют крупный Арктико-Азиатский сейсмический пояс [Имаев и др., 2000] (рис. 2).

Его сеймотектоническое положение и природа возникновения сильных землетрясений являются результатом взаимодействия крупных литосферных плит (Евразийской, Северо-Американской и Тихоокеанской), их отдельных блоков и микроплит (Охотоморской, Амурской и Берингоморской), развитых в северо-восточной части азиатского континента и соседних регионах [Зоненшайн, Савостин, 1979; Zonenshain, Savostin, 1981; Зоненшайн и др., 1990; Зоненшайн, Кузьмин, 1993; Хаин, 1994; Объяснительная записка..., 1996; Тектоническая карта..., 1998; Zonenshain et al., 1999; Добрецов и др., 2001; Гатинский и др., 2005]. Арктико-Азиатский сейсмический пояс пересекает Северный Ледовитый океан, северо-восток Азии и разграничивает Северо-Американскую плиту от Евразийской (рис. 3) и Охотоморской плит на расстоянии более 8 тыс. км. По сеймотектоническим особенностям в пределах Якутии в нем выделяются три зоны: Лаптевоморская (шельф моря Лаптевых), Хараулахская (прибрежный район Северного Верхоянья между долиной р. Лена и губой Буор-Хая) и зона хр. Черского (Верхояно-Колымская складчатая система) (рис. 4) [Козьмин, 1984]. Приведем их характеристики.

Арктическая и Лаптевоморская сеймотектонические зоны. Сейсмичность в акватории Северного Ледовитого океана представлена цепочкой эпицентров землетрясений, проходящей параллельно линии островов Шпицберген—Земля Франца-Иосифа—Северная Земля от трансформного разлома Де-Гира, трассируемого между островами Шпицберген и Гренландия к устью р. Лена. Пространственно она тяготеет к структурам срединно-океанического хр. Гаккеля, вытянутого на 1700 км при ширине 80—160 км от Гренландского шельфа к шельфу моря Лаптевых (см. рис. 2, 4). В ней с начала XX в. отмечено свыше 200 местных землетрясений с магнитудой 4.5—7.0. Очаги землетрясений группируются здесь главным образом в пределах земной коры [Fujita et al., 1990; Аветисов, 1996].

Арктический хр. Гаккеля входит в мировую систему подводных срединно-океанических хребтов Земли и является ее северным фрагментом, продолжающим Северо-Атлантический срединно-океанический хребет в бассейне Северного Ледовитого океана. Сейсмичность хр. Гаккеля обусловлена процессами рифтогенеза и, соответственно, растяжением земной коры, вызывающим спрединг океанического дна [Грачев, 1987].

Шельф моря Лаптевых и прибрежные районы континента занимает переходная зона, расположенная между структурами растяжения срединно-океанического хр. Гаккеля и структурами сжатия хр. Черского на северо-востоке азиатского континента (рис. 5). Для этой переходной зоны характерно расширение поля сейсмичности до 600 км, полностью занимающего территорию шельфа моря Лаптевых между Новосибирскими островами, п-овом Таймыр и дельтой р. Лена (рис. 6). Несомненно, что наибольшей

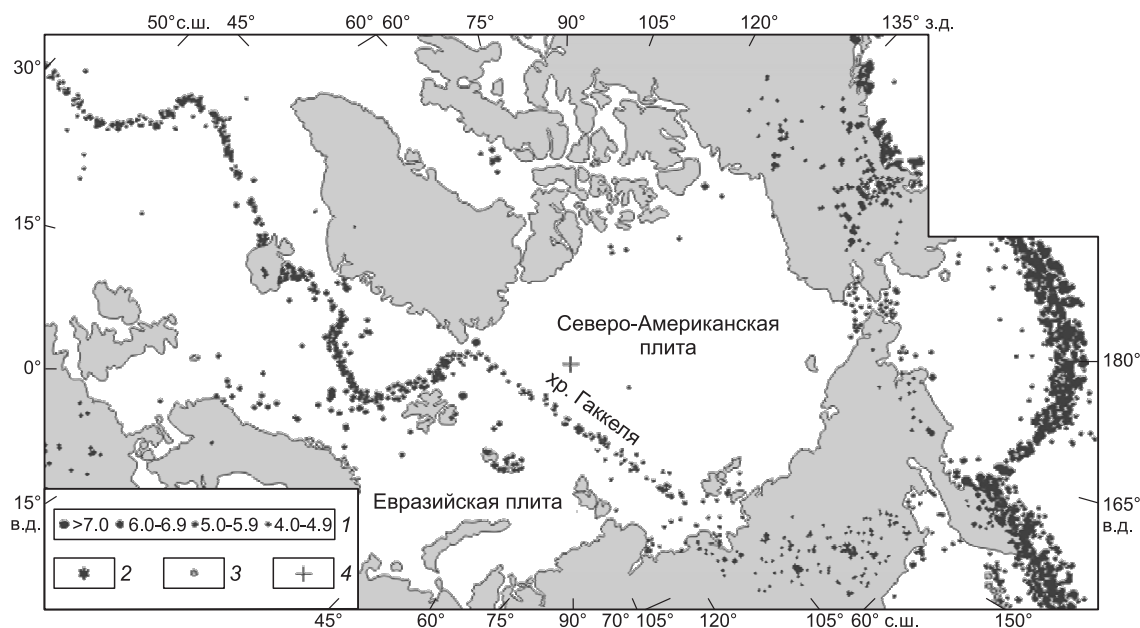


Рис. 2. Эпицентры землетрясений Арктики и прилегающих территорий.

1 — магнитуда землетрясений с глубиной очага 0—60 км; 2, 3 — землетрясения с глубиной очага: 2 — 60—300 км, 3 — более 300 км; 4 — Северный полюс.

Таблица 1. Список ощутимых землетрясений Хараулахской зоны и хр. Черского

Землетрясение	Дата, число.мес.год	С.ш., град.	В.д., град.	M	S , тыс. км ²	I_0 , балл
Ямское	27.11.1851	59.5	153.3	6.5	150	8
Булунское-1	14.11.1927	69.9	129.9	6.8	50	8—9
Булунское-2	14.11.1927	70.1	129.2	6.8	50	8—9
Тауйское	03.11.1936	59.0	151.2	5.7	150	7—8
Адычанское	12.02.1951	65.8	137.0	6.4	300	8
Иргичанское	19.04.1962	69.5	138.5	6.2	60—80	7—8
Артыкское	18.05.1971	64.	146.1	7.1	900	9
Кулинское	13.01.1972	61.9	147.1	5.7	200	7
Сеймчанское	19.06.1974	63.2	150.9	4.9	60	7
Гижигинское	19.08.1979	61.6	158.8	5.2	50	7
Оленекское	01.02.1980	73.3	122.6	5.5	170	7
Купкинское	08.11.1981	61.8	153.6	5.4	180	7
Уяндинское	22.11.1984	68.6	140.5	5.4	130	7
Андрей-Тасское	22.06.2008	67.73	141.25	6.1	400	8

Примечание. M — магнитуда землетрясения, S — площадь ощутимых сотрясений, I_0 — интенсивность сотрясений в эпицентре землетрясения по шкале MSK-64.

сейсмической опасностью обладает зона, занятая эпицентрами землетрясений, возникшими на продолжении хр. Гаккеля через шельф моря Лаптевых к устью Омолоя и р. Яна. Именно здесь выявлены основные грабены Лаптевоморского рифта, к которым приурочены очаги землетрясений с магнитудой $M = 6.0—7.0$ (или с энергетическим классом $K = 15—17$), маркирующие границу Северо-Американской и Евразийской плит.

Хараулахская сейсмотектоническая зона. Самые сильные землетрясения (Булунские) на северо-востоке Азии произошли в 1927—1928 гг. в районе Хараулахского хребта (Северное Верхоянье) [Мушкетов, Орлов, 1893; Сейсмическое районирование..., 1985]. Эпицентры пяти Булунских землетрясений с магнитудами $M = 5.8—6.8$ расположены в 140—160 км к югу от пос. Тикси (табл. 1).

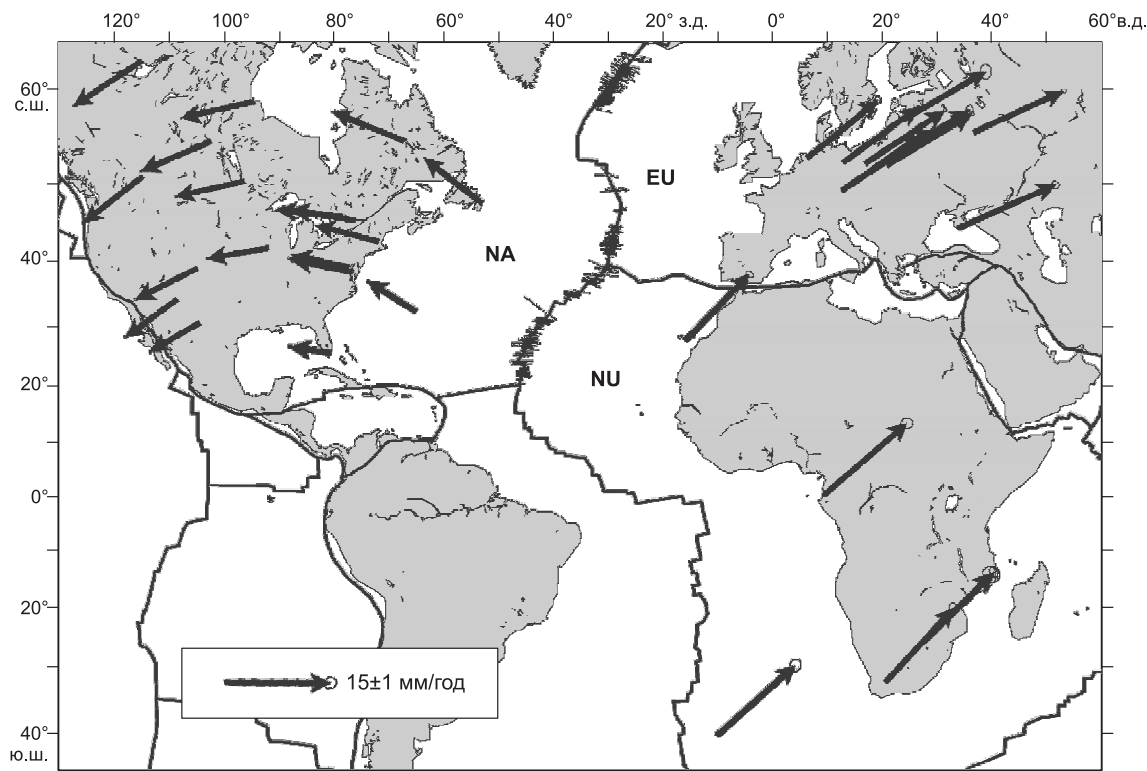


Рис. 3. Границы тектонических плит в районе Атлантического океана.

NU — Нубийская плита. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1. Стрелками показаны смещения плит (мм/год) и эллипсы ошибок.

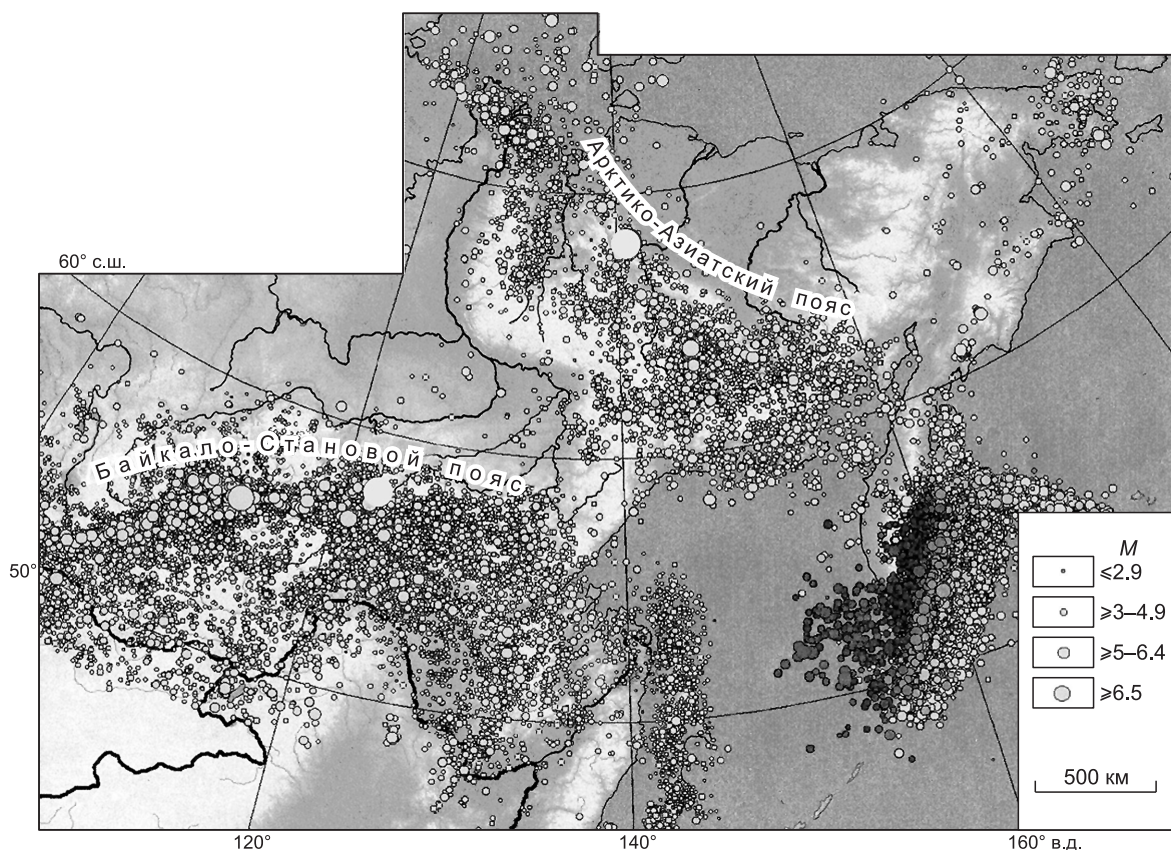


Рис. 4. Сейсмичность Дальнего Востока России, зарегистрированная за инструментальный период.

В этом районе также случились Тит-Арынское землетрясение 1963 г. с $M = 5.0$ и Быковское 1964 г. с $M = 5.3$. В 1980 г. здесь произошли два землетрясения с $M = 5.7$ в Оленекском заливе моря Лаптевых и с $M = 4.0$ вблизи пос. Тикси. Следующее ощутимое событие с $M = 4.5$ было отмечено в дельте р. Лена в 1986 г., последнее сильное местное землетрясение было зарегистрировано 1 марта 1991 г. с $M = 5.1$ в 105 км к северо-западу от пос. Тикси.

Хараулахская сеймотектоническая зона (ХСЗ) находится в пределах Арктико-Азиатского сейсмического пояса и располагается на его северо-западном фланге в зоне перехода от океанических структур хр. Гаккеля к континентальным образованиям сеймотектонической зоны хр. Черского. За последние 40 лет в пределах Хараулахской зоны зарегистрировано свыше 2.5 тыс. подземных толчков.

В целом очаги местных землетрясений в виде субмеридиональной полосы протягиваются с севера на юго-юго-восток, соединяя проявления сейсмичности в море Лаптевых и системы хр. Черского. Расчеты средней повторяемости сильных землетрясений на территории ХСЗ показали, что здесь следует ожидать появления землетрясения 14-го энергетического класса ($M = 5.5$) каждые 25 лет, 15-го ($M = 6.0$) — каждые 75 лет, 16-го ($M = 6.5$) — через 225 лет и 17-го ($M = 7.0$) — через 715 лет.

Эпицентры землетрясений Хараулахской зоны тяготеют главным образом к крупным системам разрывных нарушений (Хараулахской, При-

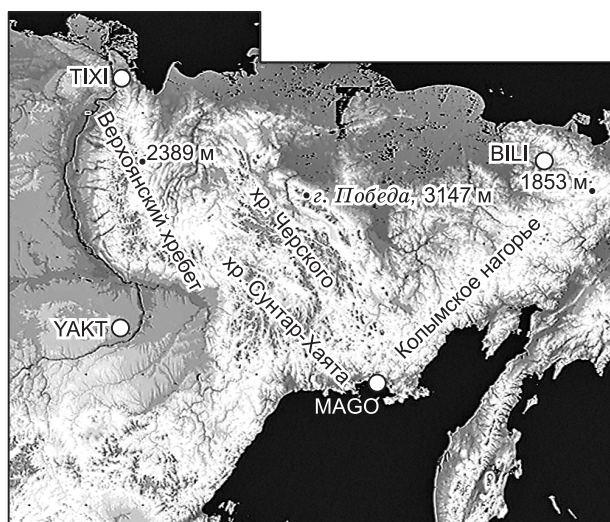


Рис. 5. Рельеф Северо-Востока России.

Постоянные станции космической геодезии: ТИХИ — Тикси, ЯАКТ — Якутск, МАГО — Магадан, БИЛИ — Билибино.

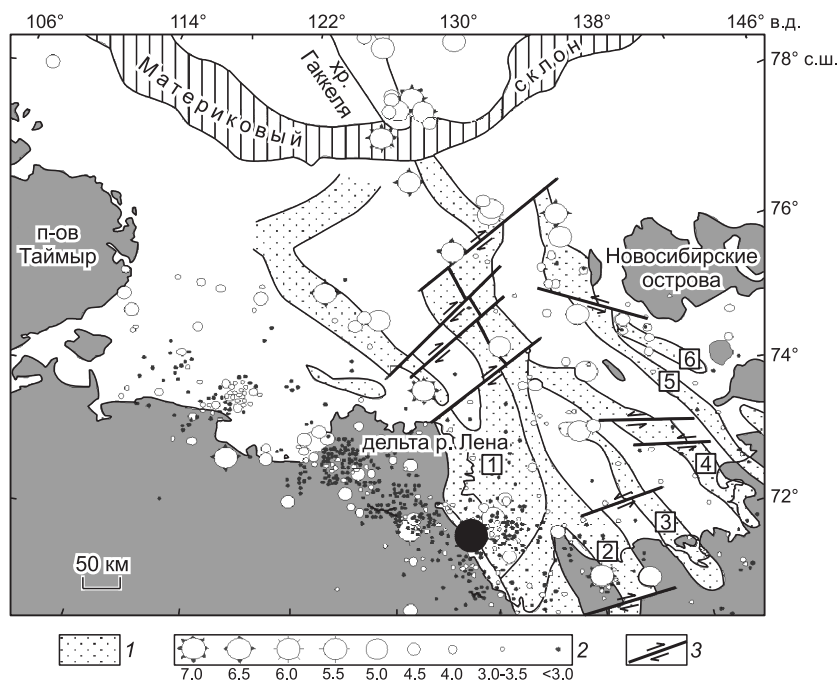


Рис. 6. Сейсмичность шельфа моря Лаптевых и дельты р. Лена.

Залитым кружком обозначено положение постоянной станции GPS-измерений ТИХИ. 1 — грабены на дне моря Лаптевых: 1 — Усть-Ленский, 2 — Усть-Янский, 3 — Чондонский, 4 — Широстонский, 5 — Бельковско-Святоносский, 6 — Ляховский; 2 — эпицентры землетрясений с магнитудой; 3 — активные сдвиги.

морской, Буорхайнской и Западно-Верхоянской), подтверждая их активность в современное время. Следует отметить, что большая часть землетрясений данной зоны района фиксируется в пределах земной коры на глубинах до 35 км. При этом глубина наиболее часто происходящих местных событий соответствует 15 км. Глубина очагов подземных толчков, отмеченных в разных частях территории, приведена в табл. 2.

Анализ напряженного состояния земной коры Хараулахской зоны свидетельствует, что на севере Якутии существует уникальная область, где происходит смена поля растяжения на поле тектонического сжатия. На земном шаре существуют лишь несколько подобных областей. К ним, например, относятся район Афарского рифта (Восточная Африка), структуры которого связаны со структурами срединно-океанического хребта в Индийском океане, и район Северной Калифорнии, где северный конец Восточно-Тихоокеанского поднятия через разлом Сан-Андреас соединяется с системой срединно-океанических хребтов Горда, Хуан де Фука и Эксплорер в Тихом океане.

Таблица 2. Интервал глубин очагов землетрясений в Хараулахской зоне и хр. Черского

Район	Интервал, км
Губа Буор-Хая моря Лаптевых	(5—23) ± 5
Найбинский кряж	(15—18) ± 5
Туостаская впадина	21 ± 8
Система хр. Черского (Артыкское землетрясение 18.05.71 г.)	22 ± 5
Афтершоки Артыкского (Оймяконского) землетрясения	(4—29) ± 3
Афтершоки Кулинского землетрясения 13.01.72 г.	(10—25) ± 5
Северное Приохотье	10—27
Север Камчатки	0—50

Сеймотектоническая зона хр. Черского (СЗЧ). Система хр. Черского состоит из ряда параллельных хребтов длиной 60—250 км, расположенных кулисообразно или продолжающих друг друга (рис. 7). Она имеет форму дуги, вогнутой к юго-западу и расположенной в междуречье Яны и Колымы. В средней части ее пересекает р. Индигирка. Между хребтами Черского и Момским протягивается цепочка Момо-Селенняхских впадин. Здесь зарегистрировано присутствие базальтового вулканизма. Общий вид позднекайнозойского влк. Балаган-Тас вблизи северо-восточного борта Момо-Селенняхских впадин приведен на рис. 8.

Граничными разломами СЗЧ являются Адычтарынский надвиг, ограничивающий СЗЧ с юго-запада и пересекающий р. Яна, а также Мятисский надвиг, ооконтуривающий Момский хребет с северо-востока и пересекающий р. Индигирка. В осевой части СЗЧ, в

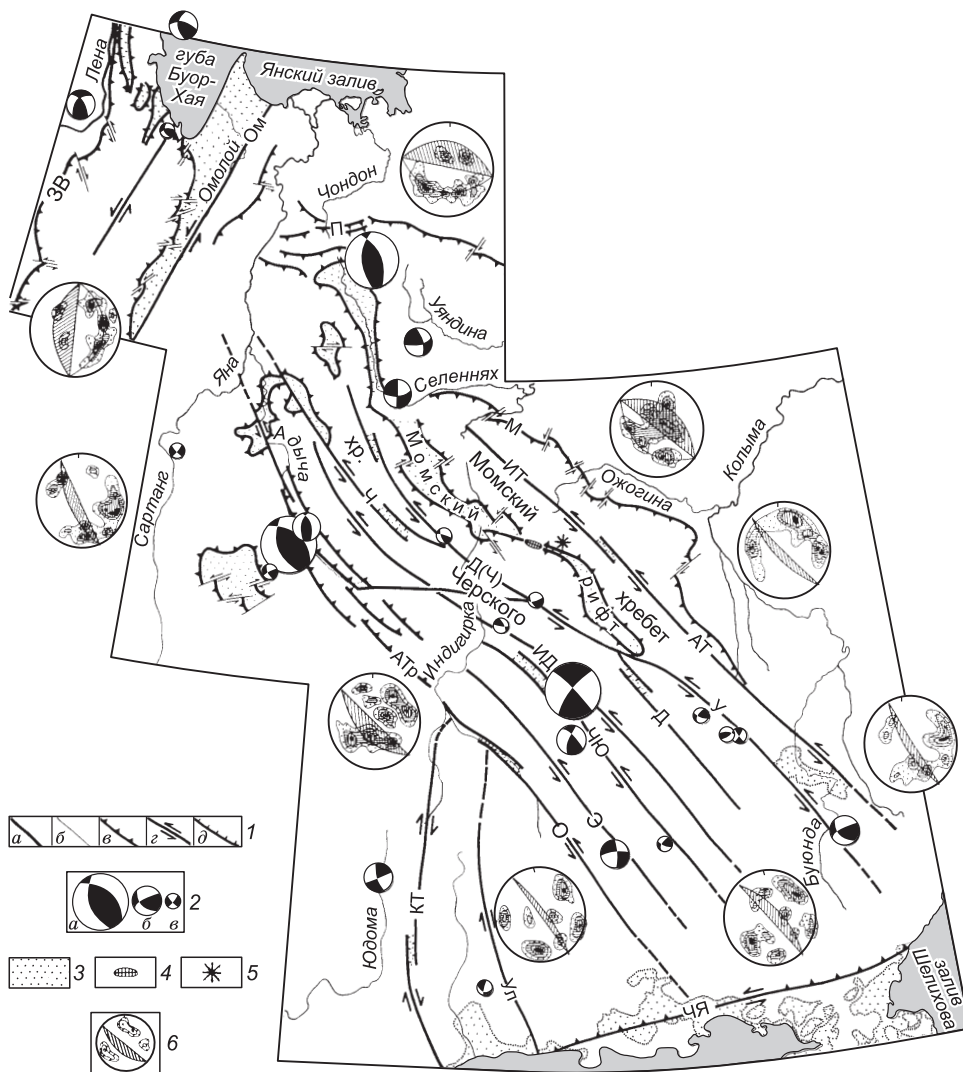


Рис. 7. Схема активных разломов сейсмотектонической зоны хребта Черского.

1 — разломы: а — генеральные, б — локальные, в — надвиги (ЗВ — Западно-Верхоянский, М — Мятисский, П — Полоусненский, АТр — Адыча-Тарынский, ЧЯ — Челомджа-Ямский), г — сдвиги (Ом — Омолонский, Ч — Чемагинский, Д(Ч) — Догдинский (Чибгалахский), ИТ — Илин-Тасский, АТ — Арга-Тасский, ИД — Иньяли-Дебинский, ЧЮ — Чай-Юреинский, Д — Дарпир, У — Улахан, Э — Эльгандинский, О — Оймяконский, Ул — Ульбейский, КТ — Кетандинский), д — сбросы; 2 — фокальные механизмы землетрясений с магнитудами: а — >6.1 , б — $5.1-6.0$, в — <5.0 ; 3 — кайнозойские впадины; 4 — Момская наледь Улахан-Тарын; 5 — позднекайнозойский влк. Балаган-Тас; б — диаграммы трещиноватости горных пород, внутри которых показаны изолинии плотности трещин, штриховкой выделена активная (главная) плоскость разлома.

центре системы хр. Черского, установлены наиболее активные разрывные структуры северо-западного простирания, являющиеся левыми сдвигами (Улахан, Чай-Юреинский, Иньяли-Дебинский и др.), к зонам влияния которых тяготеют сильные землетрясения с $M > 5.0$ и большинство выявленных здесь сейсмодислокаций. Северо-западные разломы, рассекающие осевую часть Момского хребта, также являются левыми сдвигами. Сбросовые нарушения не характерны для исследуемой территории. Отдельные локальные сбросы связаны с формированием небольших присдвиговых впадин *pull-apart* (Догдинская, Чибгалахская, Верхненерская и др.) и не распространяются за их пределы. Анализ морфокинематических характеристик разлома по данным геолого-структурных (трещиноватость, зеркала скольжения) и сейсмологических (фокальные механизмы землетрясений) наблюдений показывает, что плоскость его сместителя субвертикальна ($75-90^\circ$), он имеет северо-западное простирание ($280-320^\circ$). Определение параметров фокальных механизмов землетрясений СЗЧ показывает, что большинство подвижек в их очагах соответствуют сдвигам и взбросам (62%), надвигам (24%) и лишь 14% из них представляют сочетание сдвигов и сбросов [Имаев и др., 1990]. Изучение современного рельефа в районе пересечения



Рис. 8. Общий вид позднекайнозойского влк. Балаган-Тас вблизи северо-восточного борта Момо-Селенныхских впадин.

разломом Улахан верховьев рек Рассоха и Омулевка (бассейн р. Ясачная, притока Колымы) показало систематическое смещение их русел влево с амплитудой до 24 км в течение среднего плейстоцена—голоцена. Это позволяет оценить среднюю скорость горизонтальных тектонических движений по данному разлому в 0.5—0.7 см/год [Мальков, 1971; Шахтыров, 1985].

Пространственное распределение землетрясений показывает, что большая часть сейсмических событий за XX в. произошла в горной системе

хр. Черского, где отмечено 70 % всех подземных толчков от общего числа землетрясений, зафиксированных в СЗЧ. Сеймотектоническая зона хр. Черского, входящая в состав Арктико-Азиатского сейсмического пояса, маркирует современную границу Евразийской и Северо-Американской плит (рис. 9, а), которые сближаются в субширотном направлении. Такое движение плит подтверждается параметрами фокальных механизмов сильных землетрясений, где преобладает горизонтальное сжатие, ориентированное на юго-запад. В целом проявления сейсмичности в сеймотектонической зоне системы хр. Черского образуют единую дугообразную полосу (более 20 тыс. землетрясений за XX в.), протягивающуюся с северо-запада от Хараулахской зоны (Северное Верхоянье) на юго-восток к Охотскому морю. Ее длина составляет около 2 тыс. км, а ширина достигает 600 км. Анализ параметров фокальных механизмов сильных землетрясений показывает, что вдоль границы плит существует область смены полей тектонических напряжений растяжения на сжатие, в ее пределах срединно-океанические структуры земной коры сменяются структурами континентальными. Южнее, вдоль северного побережья Охотского моря преобладающими тектоническими напряжениями становятся сдвиговые (см. рис. 9, а).

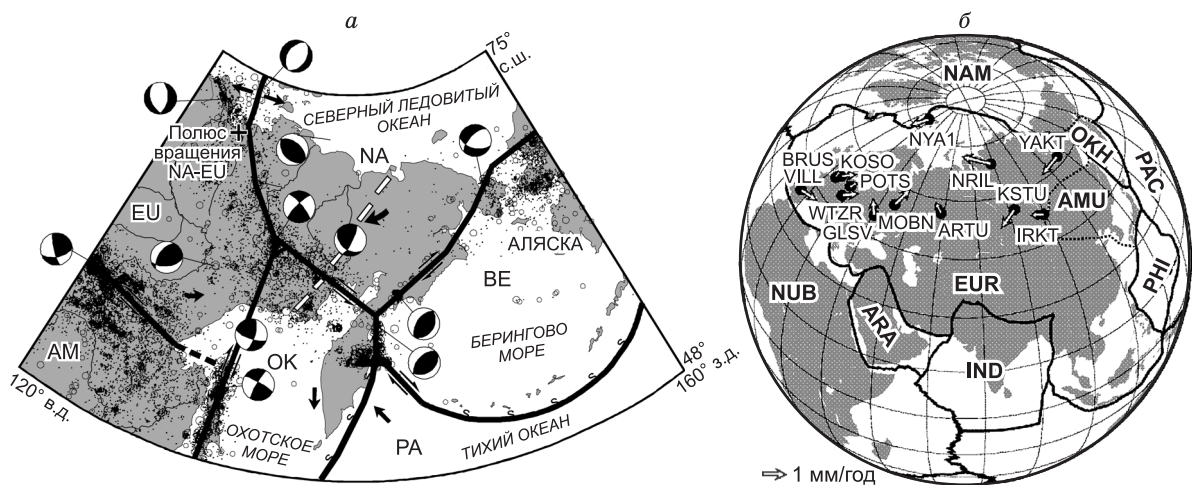


Рис. 9. Приведены положение и границы тектонических плит на северо-востоке Азии, по [Fujita et al., 1997] с дополнениями [Имаев и др., 2000] (а) и положение Евразийской и окружающих ее плит на сфере, по [Boucher et al., 2001] (б).

а — белой штриховой линией показано положение сейсмического профиля г. Магадан—о. Врангеля (2001—2008 гг.) и механизмов очагов землетрясений на границах, стрелками схематично обозначено направление смещения плит. BE — Берингоморская плита. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1. б — показано положение станций IGS-сети и стрелками — остаточные значения векторов относительно Евразийской плиты. Плиты: NAM — Северо-Американская, ОКН — Охотоморская, PAC — Тихоокеанская, AMU — Амурская, EUR — Евразийская, PHI — Филиппинская, NUB — Нубийская, ARA — Аравийская, IND — Индийская.

ПЛИТНЫЕ СМЕЩЕНИЯ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ (GPS МЕТОД)

Взаимодействие тектонических плит Земли в настоящее время активно изучается на основе данных космической геодезии [Argus, Gordon, 1996; Fujita et al., 1997, 2009; Boucher et al., 2001; Calais et al., 2003, 2006; Kreemer et al., 2003, 2006; Prawirodirdjo, 2004; Стеблов, 2004; Apel et al., 2006; Altamimi et al., 2007; DeMets et al., 2010; Shestakov et al., 2011]. Остановимся на имеющихся кинематических моделях плитных вращений и проанализируем их на примере Евразийской плиты. Из известных моделей вращения последней можно отметить геолого-геофизическую NNR-Nuvel-1A и модель APKIM-2000, построенную по экспериментальным данным станций Евразийской плиты на эпоху 2000 г. Особенностью последней модели является то, что при анализе использованы данные по всем станциям Азии и Европы, включая сейсмоактивные зоны, где развивается современный тектонический процесс, отражающийся в катастрофических землетрясениях. При построении моделей плитного движения обычно исключаются из анализа результаты по южной и центральной частям Азии как активно деформируемые в настоящее время (см. рис. 9, б). Изучение параметров вращения тектонических плит проводится на все более продолжительных временных рядах. Отклонение в пределах 1 мм соответствует повторяемости результатов экспериментов на различных временных сериях.

В рамках модели вращения плиты на сфере для определения скоростей горизонтальных смещений пункта с координатами φ и λ используются соотношения:

$$\partial\varphi/\partial t = R \cdot \omega \cdot \cos(\Phi) \cdot \sin(\lambda - \Lambda); \quad \partial\lambda/\partial t = R \cdot \omega [\sin(\Phi) - \cos(\lambda - \Lambda) \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \cdot \cos(\Phi)],$$

где Φ , Λ , ω — координаты полюса вращения плиты и его угловая скорость, R — радиус Земли.

Некоторые варианты модели для Евразийской плиты (положение полюса Эйлера и скорость за млн лет) приведены в табл. 3.

Рассматриваемая далее модель ANI-2010 построена с использованием результатов станций ARTU (Средний Урал), NVSK (Новосибирск) и IRKT (Иркутск). Станции расположены в полосе 52—56° с.ш. в тектонически стабильной части Евразийской плиты. Сравнение экспериментальных данных с модельными приведено в табл. 4, 5. Отклонение в пределах 1 мм соответствует повторяемости результатов экспериментов на различных временных сериях. Скорости вертикальных смещений (v_h) минимальны, что соответствует модели плитного движения на сфере.

Положение плит, представленных на Дальнем Востоке, проиллюстрировано на рис. 9, 10. Так, границы Охотоморской микроплиты обозначены максимумами сейсмических проявлений, приуроченных на западе к Сахалин-Хоккайдскому правому сдвиговзбросу и продолжающей его в Северном Приохотье системе субдолготных правых сдвигов (Кетандинскому, Нют-Ульбейскому и др.), на северо-востоке — к левым сдвигам зоны хр. Черского, с востока и юга — к надвигам и взбросам Курило-Камчатской зоны (фокальные механизмы землетрясений, морфокинематические характеристики разломов и др.). Северная граница

Таблица 3. Параметры твердотельного вращения Евразии

Модель	Координаты, град.		Скорость вращения, град./млн лет
	с.ш.	в.д.	
NNR-Nuvel-1A	50.631	247.725	0.2337
APKIM-2000	57.9	262.9	0.2587
SOPAC-2008	55.851	262.622	0.263
Shestakov-2008	54.2	259.3	0.251
ANI-2010	53.1	259.5	0.244

Таблица 4. Северо-восток Азии, скорости по модели Евразийской плиты 2010 г. и экспериментальные данные по постоянным станциям международной IGS-сети

Пункт (период измерений)	Координаты, град.		Модель ANI-2010		Экспериментальные данные		
	с.ш.	в.д.	v_n	v_e	v_n	v_e	v_h
NRIL (2001—2010)	69.362	88.360	-2.52	22.84	-1.915 ± 5	21.803 ± 7	1.699 ± 15
IRKT (1995—2010)	52.219	104.316	-6.85	25.10	-6.613 ± 3	24.853 ± 6	0.370 ± 11
IRKJ (2002—2010)					-6.274 ± 7	24.766 ± 12	-0.357 ± 21
YAKT (2001—2010)	62.031	126.680	-12.00	20.06	-12.072 ± 7	18.508 ± 11	0.763 ± 21
TIXI (1999—2010)	71.634	128.866	-12.43	17.01	-11.390 ± 4	16.821 ± 5	1.508 ± 12
BILI (2000—2007) (1999—2008)	68.076	166.437	-16.35	8.96	-20.41 -20.546 ± 6	+8.14 +8.493 ± 8	+1.75 +0.588 ± 18
MAGO (1998—2006) (2-й вариант 1998—2006)	59.575	150.770	-15.49	15.58	-20.17 ± 3 -19.513 ± 10	+7.51 ± 4 +9.964 ± 15	+0.26 ± 10 -0.552 ± 28

Примечание. Здесь и далее: v_n , v_e — скорости горизонтальных смещений север—юг и восток—запад соответственно (мм/год).

Таблица 5. Восточная часть Азии, смещения относительно Евразийской плиты

Пункт (период измерений)	Координаты, град.		Разность экспериментальных данных и модельных	
	с.ш.	в.д.	v_n	v_e
NRIL (2001—2010)	69.362	88.360	+0.60	-1.03
IRKT (1995—2010)	52.219	104.316	+0.23	-0.24
IRKJ (2002—2010)	»	»	+0.57	-0.33
YAKT (2001—2010)	62.031	126.680	-0.07	-1.55
TIXI (1999—2007)	71.634	128.866	+1.09	-0.51
(1999—2010)	»	»	+1.04	-0.19
BILI (2000—2007)	68.076	166.437	-4.68	-0.82
(1999—2008)	»	»	-4.196	-0.467
MAGO (1998—2006)	59.575	150.770	-3.68	-8.07
(2-й вариант, 1998—2006)	»	»	-4.023	-5.616

Амурской плиты проходит по Байкало-Становому сейсмическому поясу (см. рис. 4), восточная граница — по Сахалин-Хоккайдскому разлому, хотя есть представления, что она пролегает западнее — по разлому Тан-Лу. Смещения относительно Евразийской плиты в восточной части Амурской, по данным сетевых GPS-измерений, показаны на рис. 10. Несмотря на малые величины остаточных значений (2 мм/год), параметры вращения Амурской плиты методами космической геодезии активно изучаются в последние годы [Тимофеев и др., 2008, 2011; Ашурков и др., 2011]. В результате установлено, что наиболее вероятное положение полюса вращения Амурской плиты составляет: 57—60° с.ш., 117—123° в.д. Для скорости вращения плиты наиболее правдоподобен разброс оценок от 0.07 до 0.10 град./млн лет.

Скорости смещений относительно Евразийской плиты по сетевым и постоянным GPS-станциям северо-востока приведены на рис. 10, б. Для пунктов, расположенных восточнее границы плит, показано направление смещений на юг и юго-запад. Для остаточных значений (экспериментальные данные — модельные скорости) по постоянным станциям северо-восточной части Азии наиболее точно можно определить аномальные смещения для станций Билибино (BILI) и Магадан (MAGO) (см. табл. 5). Все эти факты говорят о том, что восточные пункты относятся к другой плите (Северо-Американской).

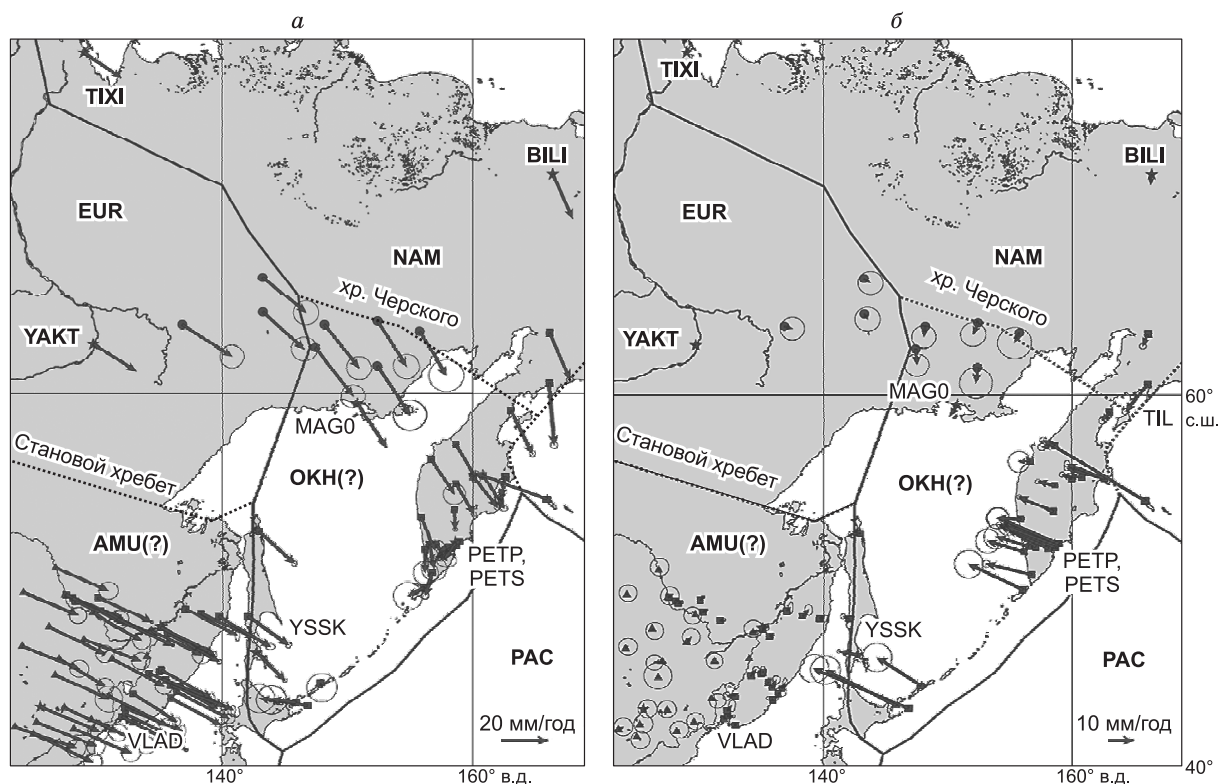


Рис. 10. Геоцентрические скорости горизонтальных смещений для восточной части России (а), скорости горизонтальных смещений относительно Евразийской плиты (б).

Усл. обозн. см. на рис. 9, б.

Модельные параметры вращения тектонических плит, расположенных на Дальнем Востоке, полученные разными авторами [Munekane, Fukuzaki, 2006; Jin et al., 2007], приведены в табл. 6—8. Они различаются количеством станций, использованных при вычислениях (до 22). Методами статистики обычно оценивается существование 2-, 3-, 4- или 5-плитной комбинации [Stein, Gordon, 1984]. Анализ 5-плитной комбинации моделей для Дальнего Востока проведен в работе [Apel et al., 2006], где показано существование Амурской и Охотоморской плит. Для дальнейших вычислений на Северо-Американской плите нами использованы параметры по модели MORVEL-2010, полученные на основе данных более 450 станций [DeMets et al., 2010], координаты полюса Эйлера — 6.8° с.ш., 84.8° в.д. и скорость 0.189 град./млн лет (табл. 9).

Таблица 6. **Параметры моделей плит, сходящихся на Дальнем Востоке России, 4-плитная конфигурация, по [Munekane, Fukuzaki, 2006]**

Плита	Координаты, град.		Скорость, град./млн лет	Эллипс ошибок		Азимут, град.	N
	з.д.	с.ш.		max	min		
AMU	125.5	64.2	0.303 ± 0.016	4.9	3.1	13.0	5
EUR	101.0	56.6	0.252 ± 0.005	1.3	0.8	99.0	10
NAM	86.3	7.1 ю.ш.	0.194 ± 0.004	1.3	0.5	99.0	10
PAC	112.5 в.д.	63.5 ю.ш.	0.684 ± 0.003	0.4	0.2	94.6	14

Примечание. N — количество станций, по которым проводились определения.

Таблица 7. **Параметры моделей плит, сходящихся на Дальнем Востоке России, решение центра SOPAC [http://sopac.ucsd.edu]**

Плита	Координаты, град.		Скорость, град./млн лет	Эллипс ошибок		Азимут, град.	N
	з.д.	с.ш.		max	min		
AMU	101.663	56.763	0.282 ± 0.005	5.44	0.45	124.0	3
EUR	97.378	55.851	0.263 ± 0.001	0.53	0.16	54.0	17
NAM	88.473	6.207 ю.ш.	0.187 ± 0.002	0.90	0.23	97.0	22
OKH	158.673	7.537	0.091 ± 0.007	9.07	1.96	132.0	3
PAC	112.235 в.д.	62.225 ю.ш.	0.680 ± 0.003	0.51	0.25	174.0	6

Таблица 8. **Пример определения параметров Северо-Американской плиты по данным 13 пунктов наблюдения, расположенных на плите**

Координаты пункта, град.		v_n , мм/год				v_e , мм/год			
с.ш.	в.д.	Вычис.	Набл.	Разность	Ошибка	Вычис.	Набл.	Разность	Ошибка
46.0	281.9	1.9	1.4	-0.5	± 0.6	-16.8	-16.5	0.3	± 0.6
32.4	295.3	6.9	7.2	0.3	± 0.6	-12.6	-12.4	0.2	± 0.6
58.8	265.9	-4.1	-3.8	0.3	± 0.6	-19.1	-17.9	1.2	± 0.7
50.3	264.1	-4.7	-4.6	0.1	± 0.7	-17.4	-17.4	0.0	± 0.7
54.7	258.0	-6.9	-8.0	-1.1	± 0.6	-17.8	-17.5	0.3	± 0.6
67.0	309.1	11.5	11.2	-0.3	± 0.6	-17.5	-17.8	-0.3	± 0.6
30.7	256.0	-7.6	-6.8	0.8	± 0.6	-12.0	-12.5	-0.5	± 0.6
41.8	268.4	-3.1	-2.4	0.7	± 0.6	-15.7	-15.5	0.2	± 0.6
34.3	251.9	-9.1	-8.7	0.4	± 0.6	-12.6	-13.1	-0.5	± 0.6
54.8	293.2	6.1	6.8	0.7	± 0.7	-18.0	-18.2	-0.2	± 0.7
47.6	307.3	11.0	11.6	0.6	± 0.6	-15.0	-15.2	-0.2	± 0.6
76.5	291.2	5.4	4.5	-0.9	± 0.6	-20.7	-21.8	-1.1	± 0.6
62.5	245.5	-11.2	-11.3	-0.1	± 0.6	-17.2	-16.6	0.6	± 0.6

Примечание. Координаты модели Северо-Американской плиты — $5.2 \pm 1.2^\circ$ с.ш., $83.2 \pm 0.5^\circ$ в.д., угловая скорость 0.194 ± 0.003 град./млн лет.

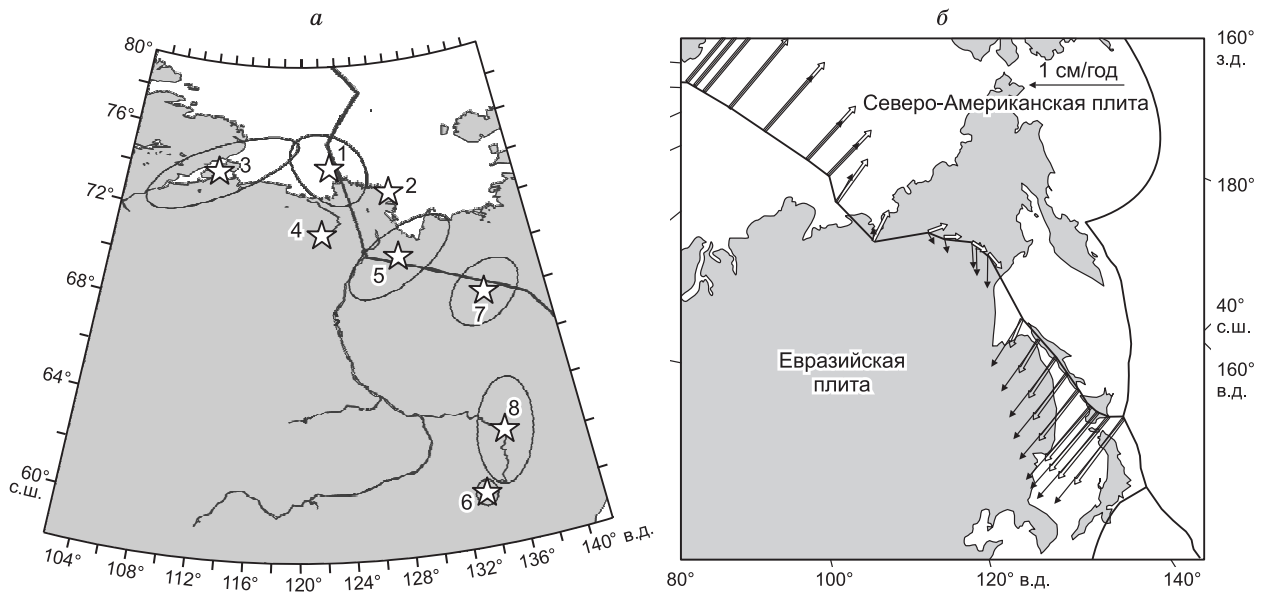


Рис. 11. Положение полюса взаимного вращения Евразийской и Северо-Американской плит по результатам, полученным различными авторами (а), смещение по границе плит по различным моделям [Стеблов, 2004] (б).

а — 1 — [Kogan et al., 2000]; 2 — [Altamimi et al., 2007]; 3 — [Argus, Gordon, 1996]; 4 — [Cook et al., 1986]; 5, 6 — [Calais et al., 2006]; 5 — по данным GPS, 6 — по геологическим данным; 7 — [Sella et al., 2002]; 8 — [Boucher et al., 2001].

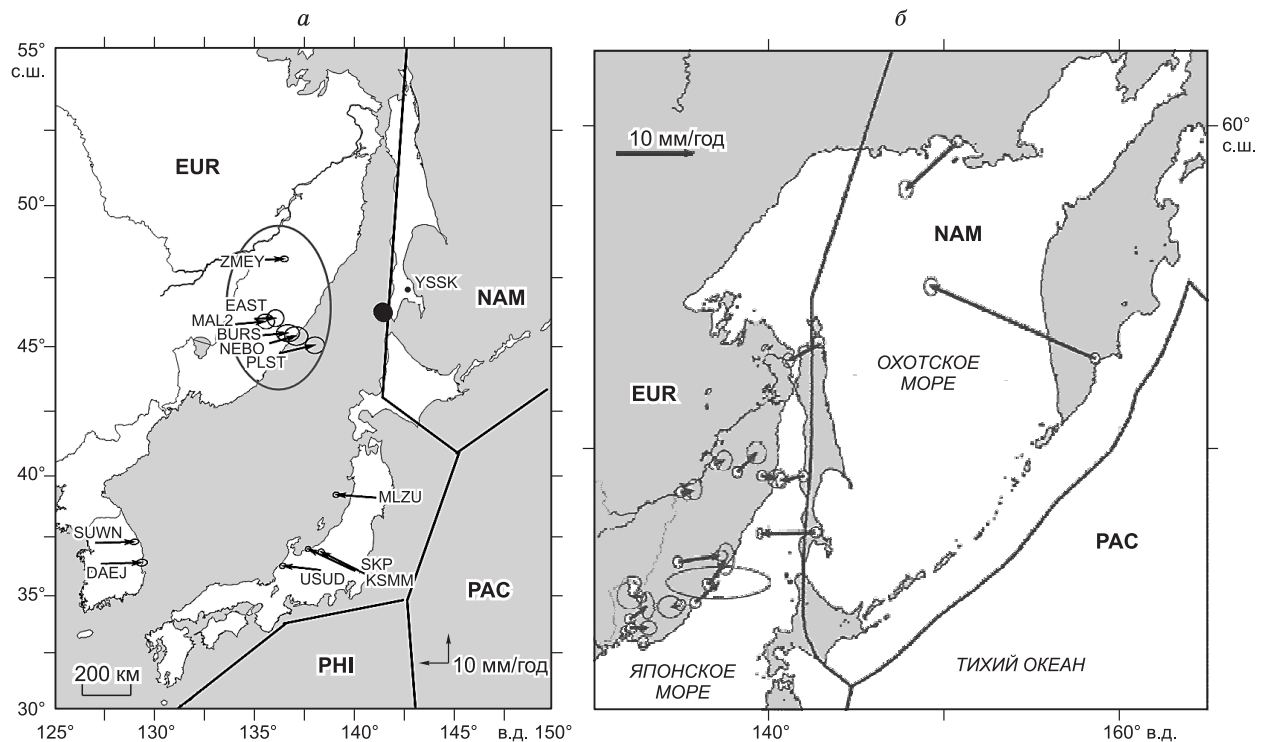


Рис. 12. Смещение пунктов Сихотэ-Алиньской сети (ограничено овалом) относительно г. Южно-Сахалинск (пункт YSSK, 2003—2006 гг.) перед Невельским землетрясением 2.08.2007 г., $M = 6.5$ —7.0 (а), смещение пунктов о. Сахалин относительно Евразийской плиты (б).

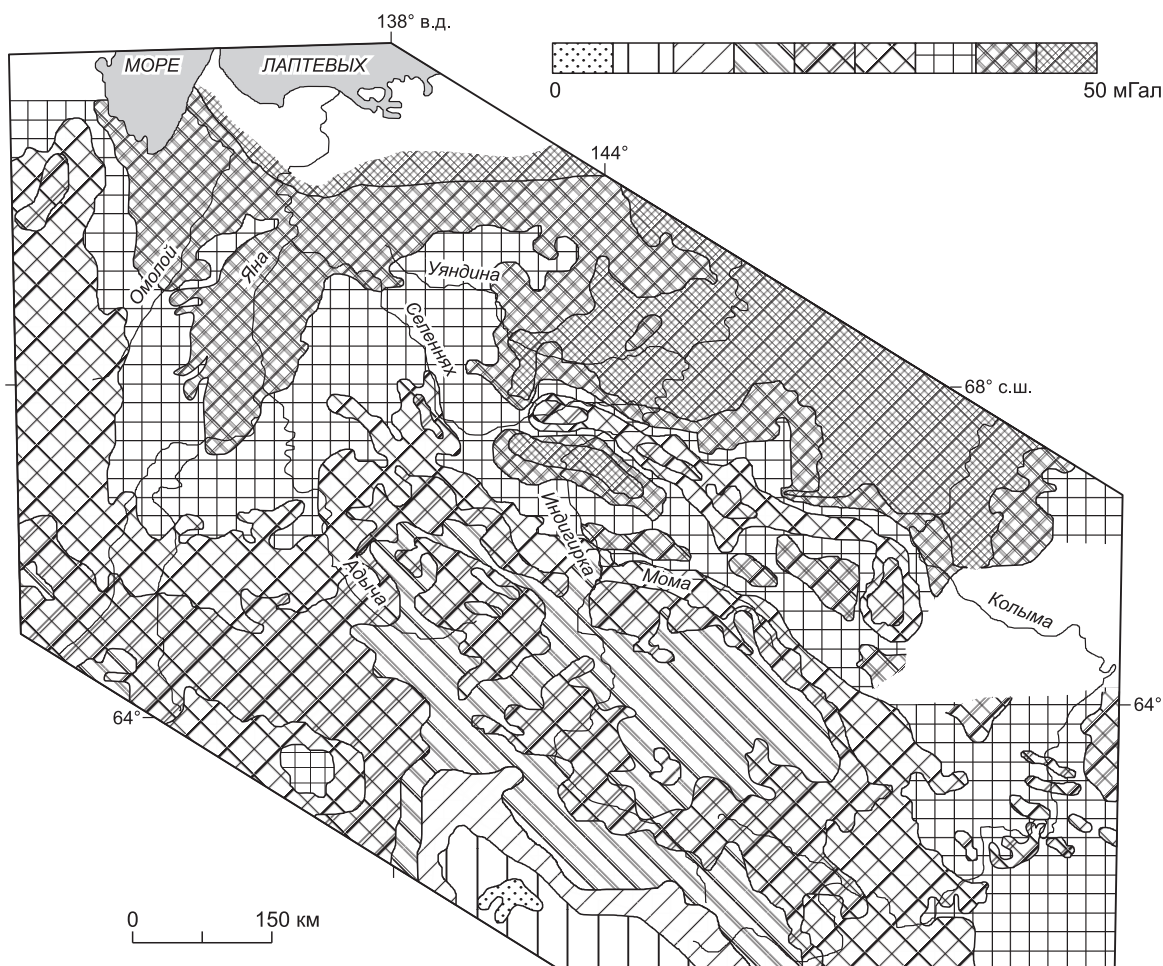


Рис. 13. Аномалии поля силы тяжести зоны межплитной границы.

Количественный анализ проведен по данным постоянных станций IGS-сети. Рассматривая положения станций BILI, MAGO и TIXI (см. табл. 9), видно, что станция BILI хорошо соответствует модельному движению (отклонение в пределах 1 мм). Станция TIXI, очевидно, находится на границе плит и приблизительно соответствует плитному движению по моделям и Евразийской, и Северо-Американской плит (см. табл. 5, 9). Из анализа скоростей азиатских станций Северо-Американской плиты (см. табл. 9) получено anomalous смещение станции MAGO относительно BILI. Этот факт свидетельствует о наличии зоны современного деформирования в области границы плит, пролегающей между этими станциями. Характер деформирования пункта MAGO относительно пункта BILI — сдвиговый, направление смещений на ЮЗЗ. Граница Охотоморской и Северо-Американской плит, по мнению ряда авторов, проходит в южной части хр. Черского в зоне Улаханского разлома.

Положение полюса взаимного вращения Евразийской и Северо-Американской плит, по мнению различных исследователей [Cook et al., 1986; Argus, Gardon, 1996; Kogan et al., 2000; Sella et al., 2002; Steblou et al., 2003; Calais et al., 2003; Altamimi et al., 2007], находится в широком диапазоне — от 74° с.ш., 110° в.д. до 60° с.ш., 135° в.д., фактически располагаясь вдоль границы плит (см. рис. 11, а). По последним определениям [Kogan, Steblou, 2008], положение полюса — 67.41° с.ш. и 137.87° в.д., а скорость вращения составляет 0.226 ± ± 0.005 град./млн лет.

Таблица 9. Остаточные значения горизонтальных скоростей (мм/год) для пунктов, расположенных на северо-востоке Азии

Пункт (период измерений)	Координаты, град.		Разность экспериментальных данных и модельных	
	с.ш.	в.д.	v_n	v_e
BILI (2000—2007)	68.076	166.437	+0.75	+0.55
MAGO (1998—2006)	59.575	150.770	-2.12	-3.89
TIXI (1999—2010)	71.634	128.866	-0.02	-1.609

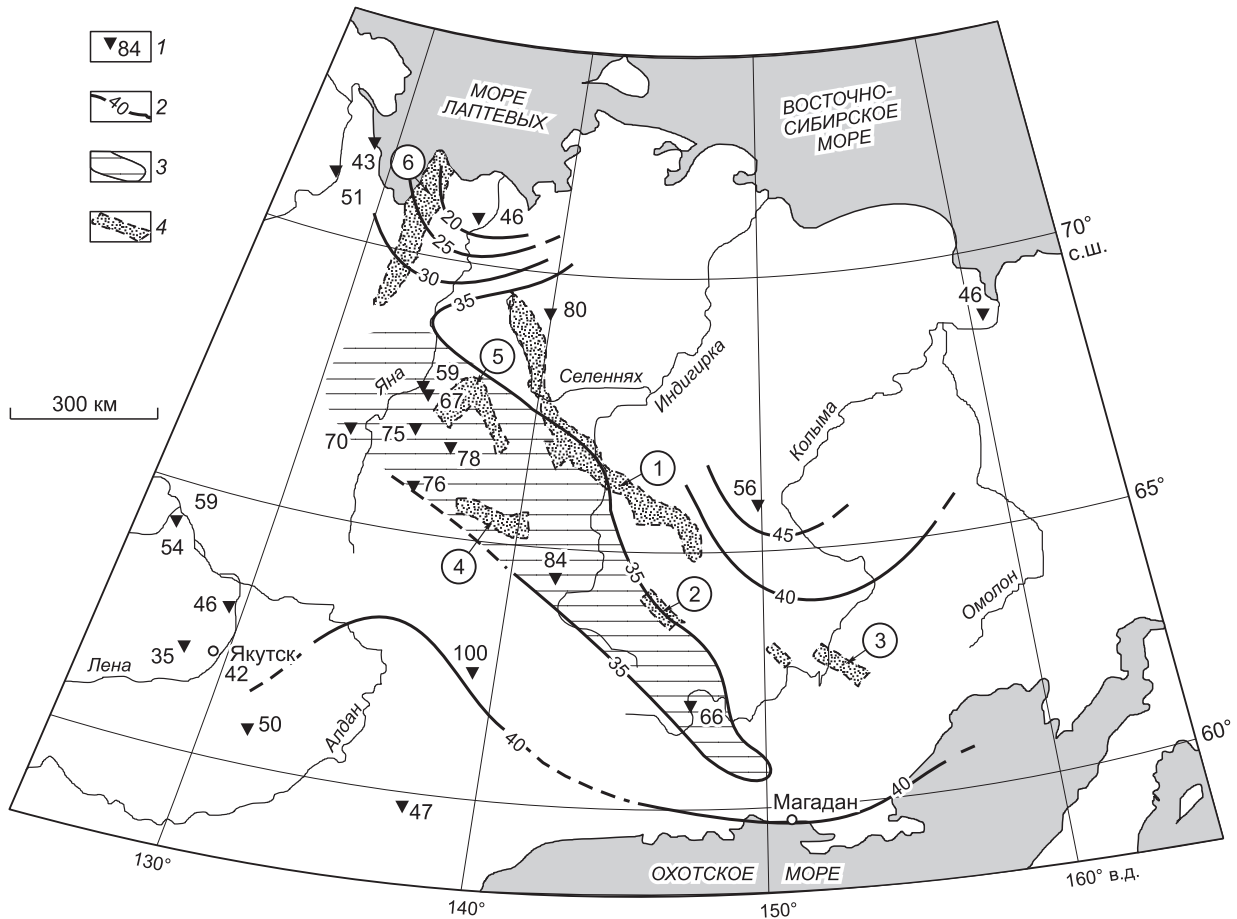


Рис. 14. Толщина земной коры и проявления теплового потока на юго-восточном фланге Арктико-Азиатского сейсмического пояса [Maskey et al., 1998].

1 — точечные определения теплового потока (мВт/м^2); 2 — изолинии мощности земной коры (км); 3 — область утонения земной коры; 4 — кайнозойские впадины (цифры в кружках): 1 — Момо-Селенняхская, 2 — Верхненерская, 3 — Сеймчано-Буюндинская, 4 — Верхнеадычанская, 5 — Туостаская, 6 — Омолойская.

Относительное смещение на границе можно проиллюстрировать на примере двух точек границы по расчетам с использованием моделей Евразийской и Северо-Американской плит (на 2010 г.). Для точки на берегу океана (72° с.ш., 129° в.д.) смещение относительно Евразийской плиты составляет 2.05 мм/год (-0.16 мм/год на юг, -2.05 мм/год на запад) на запад, для точки на континенте (65° с.ш., 141° в.д.) — 5.22 мм/год (-1.37 мм/год на юг, -5.04 мм/год на запад) на ЮЗЗ. В целом смещение на границе по направлению и величине соответствует схеме, представленной на рис. 11, б.

Схема взаимодействия плит показывает увеличение сжатия относительно Евразийской вдоль границы с севера на юг азиатской части Северо-Американской плиты от пос. Тикси вдоль хр. Черского. В южной субширотной части хребта граница Северо-Американской и Охотоморской плит характеризуется появлением сдвиговой компоненты горизонтальных смещений (см. табл. 9). Как отмечено выше, смещение может составлять около 4 мм/год . По более ранним вычислениям, представленным в работе [Arel et al., 2006], смещение составляет около 3 мм/год . Значительно южнее, на о. Сахалин, относительное смещение достигает 10 мм/год (Евразийской относительно Северо-Американской плиты или Амурской относительно Охотоморской). Использование модельных представлений в сравнении с экспериментальными данными по постоянным станциям и сетевым пунктам Сихотэ-Алинской сети Дальнего Востока показано на рис. 12.

СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ГРАНИЦАХ ПЛИТ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Рассмотрим информацию о строении земной коры в районе границ плит, двигаясь с севера на юг, начиная с Арктической зоны. Имеющиеся данные морской геофизики, дополненные материалами Мор-

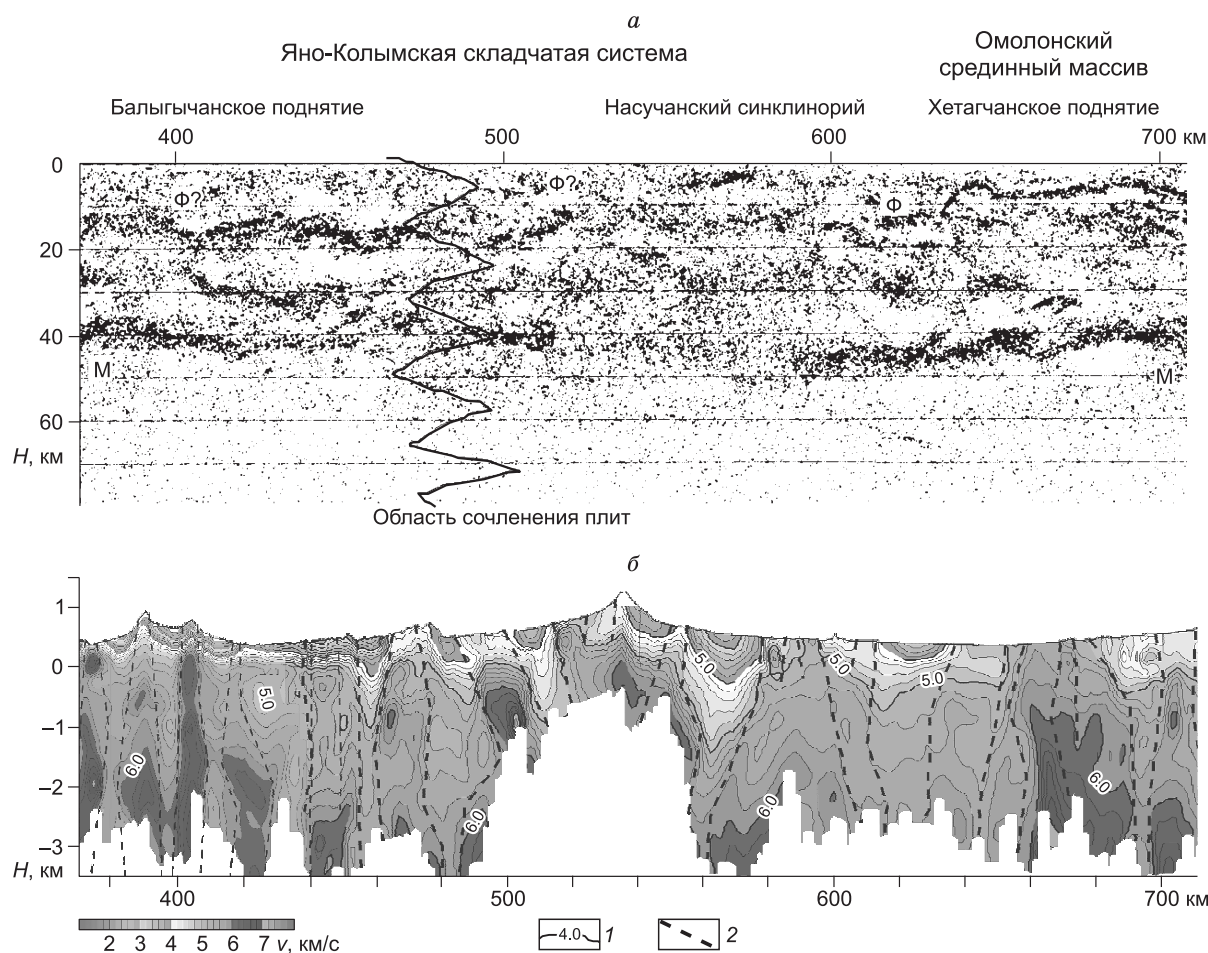


Рис. 15. Фрагменты разрезов, полученных методами ОГТ (а) и КМПВ (б) по профилю г. Магадан—о. Врангеля.

1 — изолинии скоростей, км/с; *2* — глубинные разломы.

ской арктической геолого-разведочной экспедиции (МАГЭ) ПГО «Севморгеология», позволили выявить характерные особенности строения шельфа моря Лаптевых [Грамберг и др., 1990; Аветисов, Гусева, 1991; Аветисов, 1996]. Основными структурными единицами шельфа являются протяженные грабены и разделяющие их поднятия (горсты), занимающие его южную часть и образующие рифтовую систему моря Лаптевых. По данным МАГЭ, она прослеживается также к северу, где сочленяется в области континентального склона с зоной хр. Гаккеля. Ширина южной части рифтовой системы составляет 350—400 км, длина — 400—450 км. Система узких грабенов и прогибов северо-западного простирания (Усть-Ленский, Омолойский, Усть-Янский, Чондонский, Бельковско-Святоносский и др.), имеющих длину до 200—250 км при ширине 40—60 км, была выявлена на дне моря Лаптевых по сейсмическим данным, полученным с помощью МОВ объединением «Севморгеология» (см. рис. 6). Наличие этих грабенов подтверждается также особенностями распределения поля силы тяжести в восточной части моря Лаптевых в виде чередования узких линейных высокоградиентных зон северо-западного и субдолготного простираний, протягивающихся от континентального склона на побережье. Магнитное поле в переходной зоне практически однородно в отличие от резкой полосовой картины магнитных аномалий, соответствующей линейной структуре хр. Гаккеля. Названные впадины разделены между собой и ограничены совокупностью подводных поднятий: Центрально-Лаптевским, Шилонской структурной террасой, Столбовским горстом и др.

В континентальной части пограничная область Евразийской и Северо-Американской плит проявляется в полях силы тяжести и теплового потока. В поле силы тяжести (рис. 13) указанная зона приурочена к крупному гравитационному уступу, отделяющему тяжелые породы Колымского блока от более легких масс Верхояно-Колымской складчатой области. Ось уступа примерно совпадает с трассами генеральных разломов Улахан и Дарпир.

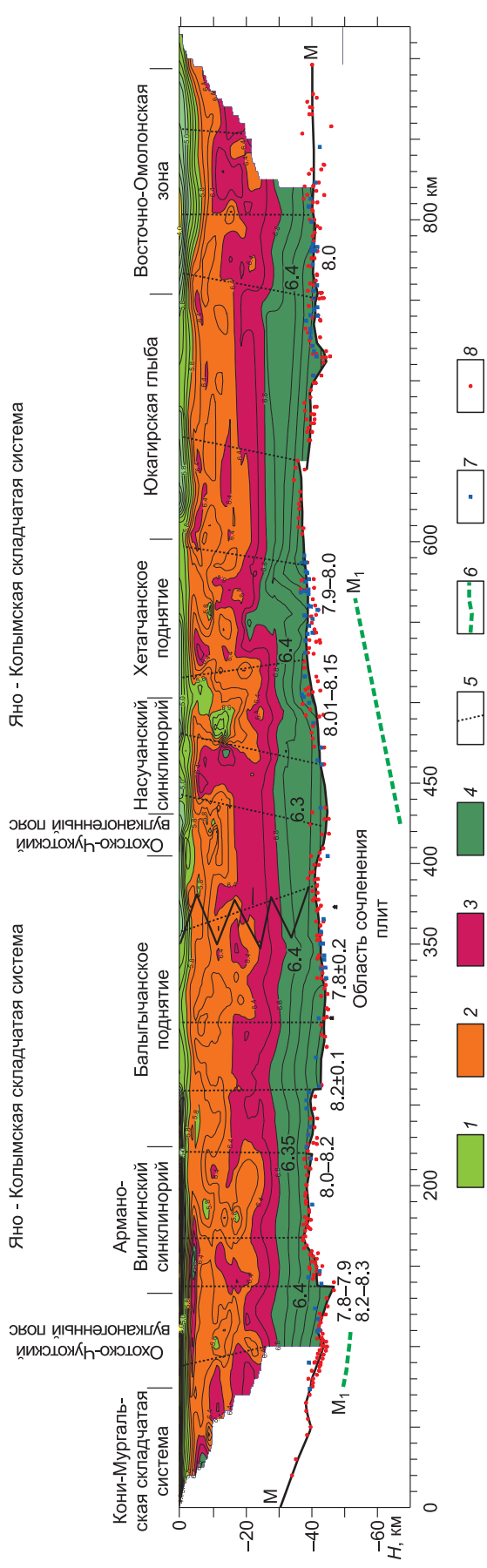


Рис. 16. Фрагмент разреза ГСЗ, полученного по профилю г. Магадан—о. Врангеля.

1 — вулканогенно-осадочный комплекс ($v_p < 5.8$ км/с); 2 — гранитоидный слой ($v_p = 5.8—6.4$ км/с); 3 — гранулитовый слой ($v_p = 6.4—6.8$ км/с); 4 — базитовый слой ($v_p > 6.8$ км/с); 5 — разрывные нарушения; 6 — поверхность верхней мантии (M_1); 7, 8 — поверхность М по данным: 7 — преломленных, 8 — отраженных волн. Цифрами указаны скорости сейсмических волн (км/с).

На существование границы плит также указывает высокий тепловой поток (рис. 14), фиксируемый в настоящее время прямыми измерениями в скважинах (хр. Черского — 88 мВт/м², хр. Сунтар-Хаята — 100 мВт/м²) [Maskey et al., 1998; Горнов и др., 2009; Горнов, 2011]. О наличии границы свидетельствуют проявления позднекайнозойского базальтового вулканизма (вулканы Балаган-Тас и Урага-Хая), а также минерализованных источников подземных вод с температурой до 20 °С, известных в системе Момо-Селенныхских впадин.

Комплексный анализ сейсмологических данных и материалов глубинных сейсмических исследований позволил выделить область сочленения Северо-Американской и Охотоморской плит (рис. 15) в структуре земной коры на разных глубинах вплоть до поверхности Мохоровичича.

Так, опорный геолого-геофизический профиль 2ДВ [Сурков и др., 2007] в южной части пересекает смежные участки Охотоморской и Северо-Американской плит. По существующим геодинамическим представлениям граница сочленения проходит по разлому Улахан в южной части хр. Черского (см. рис. 15, 16).

Известно, что разлом Улахан представляет собой крупнейшую сдвиговую систему на Северо-Востоке России, на большей своей части он сейсмоактивен, а в зоне его влияния обнаружено несколько сейсмодислокаций [Мальков, 1971; Шахтыров, 1985]. По материалам ГСЗ на региональном геотрансекте 2ДВ (г. Магадан—о. Врангеля) в зоне сочленения отмечается значительное уменьшение значений граничных скоростей по поверхности Мохо до 7.5—7.7 км/с и локальный подъем границы Мохоровичича на 2—4 км (см. рис. 16).

Понижение граничных скоростей по поверхности М на участках сочленения крупных террейнов отмечалось и ранее при работах ГСЗ, а также на других участках профиля 2ДВ и 2ДВ-А. Оно может быть связано с переработкой субстрата земной коры, что привело к утончению коры в области сочленения и понижению скоростей по поверхности Мохо [Сурков и др., 2007].

На глубинном сейсмотомографическом разрезе в данной зоне отмечается чрезвычайно неоднородная средняя кора. Снижение контрастности отражений для низов коры и раздела Мохоровичича в более широкой зоне отмечается также на разрезе ОГТ. В данной зоне отмечается уменьшение сред-

них (эффективных) скоростей во всей толще земной коры, что может свидетельствовать о большой раздробленности структур земной коры. Эти материалы наряду с повышенной сейсмичностью на глубинах до 30 км свидетельствуют о проявлении области сочленения Охотоморской и Северо-Американской плит не только в верхней части земной коры, но и в средней и нижней ее частях, а также на границе Мохоровичича.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ моделей вращения Евразийской плиты для 2008 и 2010 гг., получены параметры моделей.

Уточнено положение границы плит Евразийской и Северо-Американской на Северо-Востоке России. Она простирается с севера на юг от пос. Тикси вдоль хр. Черского. Согласно сейсмологическим данным и результатам GPS-измерений, эта граница выделяется обстановкой современного сжатия, смещения составляют до 5 мм/год.

Севернее берега Охотского моря широким поясом проходит граница Северо-Американской и Охотоморской плит. По сейсмическим данным получено ее положение. Она проходит в южной части хр. Черского в районе разлома Улахан. По сейсмологическим и GPS-данным смещения здесь носят преимущественно сдвиговый характер (до 3—4 мм/год).

Землетрясения, зарегистрированные на обеих границах, расположены в пределах земной коры, мощность которой достигает 40 км. Максимальная зарегистрированная магнитуда землетрясений (по Рихтеру) в этих районах составляла $M = 7$.

Следует подчеркнуть, что проходящие по континенту границы, возможно, из-за особенностей формирования, практически являют собой «веер» границ, занимающий территорию до сотен километров.

Авторы выражают благодарность рецензентам статьи за ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке гранта Президиума РАН № 16, проект № 8; проекта ОНЗ 6-2; интеграционного проекта СО РАН № 44.

ЛИТЕРАТУРА

- Аветисов Г.П.** Сейсмоактивные зоны Арктики. СПб., ВНИИОкеанология, 1996, 185 с.
- Аветисов Г.П., Гусева Ю.В.** Глубинное строение района дельты Лены по сейсмологическим данным // Сов. геология, 1991, № 4, с. 73—81.
- Ашурков С.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В., Сорокин А.П., Серов М.А., Бызов Л.М.** Кинематика Амурской плиты по данным GPS-геодезии // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (2), с. 299—311.
- Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С.** Блоковая структура и кинематика Восточной и Центральной Азии по данным GPS // Геотектоника, 2005, № 5, с. 3—19.
- Горнов П.Ю.** Геотермия Востока Евразии (характеристика и подробный анализ). Академическое издательство Ламберта. Саарбрюкен. Германия. 2011, 129 с., ISBN: 978-3-8443-5410-2.
- Горнов П.Ю., Горошко М.В., Малышев Ю.Ф., Подгорный В.Я.** Геотермические разрезы земной коры области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов и смежных платформ // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (5), с. 630—647.
- Грамберг И.С., Деменицкая Р.М., Секретов С.Б.** Система рифтогенных грабенов шельфа моря Лаптевых как недостающее звено рифтового пояса Гаккеля-Момского хребта // Докл. АН СССР, 1990, т. 311, № 3, с. 689—694.
- Грачев А.Ф.** Рифтовые зоны Земли. Л., Недра, 1987, 285 с.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.** Глубинная геодинамика. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 408 с.
- Зоненшайн Л.П., Савостин Л.Л.** Введение в геодинамику. М., Недра, 1979, 311 с.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И.** Глубинная геодинамика Земли // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (4), с. 3—12.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.Н.** Тектоника литосферных плит территории СССР. М., Недра, 1990, т. 1, 327 с.; т. 2, 334 с.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.** Активные разломы и сеймотектоника Северо-Восточной Якутии. Якутск, ЯНЦ СО АН СССР, 1990, 138 с.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.** Сеймотектоника Якутии. М., ГЕОС, 2000, 226 с.

- Козьмин Б.М.** Сейсмические пояса Якутии и механизм очагов их землетрясений. М., Наука, 1984, 125 с.
- Мальков Б.И.** Схема развития юго-восточной части Яно-Колымской геосинклинальной системы // Мезозойский тектогенез: материалы 7-й сессии научного совета по тектонике Сибири и Дальнего Востока. Хабаровск, ИТиГ ДВО АН СССР, 1971, с. 35—41.
- Мушкетов И.В., Орлов А.П.** Каталог землетрясений Российской империи. Т. 26. СПб., Типография Императорской АН, 1893, 582 с.
- Объяснительная записка** к «Тектонической карте Баренцева моря и северной части Европейской России», м-б: 1:2 500 000 / Под ред. Н.А. Богданова, В.Е. Хаина. М., ИЛ РАН, 1996, 94 с.
- Сейсмическое районирование** территории СССР / Под ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшкова. М., Наука, 1985, 307 с.
- Стеблов Г.М.** Взаимодействие тектонических плит в Северо-Восточной Азии // Докл. РАН, 2004, т. 394, № 5, с. 689—692.
- Сурков В.С., Сальников А.С., Кузнецов В.Л., Липилин А.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М.** Строение земной коры Магаданского сектора северо-востока России по данным ГСЗ // Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным. Сборник науч. трудов. Новосибирск, Наука, 2007, с. 13—21.
- Тектоническая карта** морей Карского и Лаптевых и севера Сибири, м-б: 1:2 500 000 / Ред. Н.А. Богданов. М., ИЛ РАН, 1998.
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Горнов П.Ю., Малышев Ю.Ф., Бойко Е.В.** Результаты анализа данных GPS измерений (2003—2006 гг.) на Дальнем Востоке по Сихотэ-Алиньской сети // Тихоокеанская геология, 2008, т. 27, № 4, с. 39—49.
- Тимофеев В.Ю., Казанский А.Ю., Ардюков Д.Г., Метелкин Д.В., Горнов П.Ю., Шестаков Н.В., Бойко Е.В., Тимофеев А.В., Гильманова Г.З.** О параметрах вращения Сибирского домена и его восточного обрамления в различные геологические эпохи // Тихоокеанская геология, 2011, т. 30, № 4, с. 21—31.
- Хаин В.Е.** Тектоника плит. Анализ современного состояния // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология, 1994, № 1, с. 3—10.
- Шахтыров В.Г.** Разломные и сдвиговые морфоструктуры Северо-Востока СССР // Морфоструктурные исследования. Теория и практика. М., Наука, 1985, с. 190—194.
- Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., Boucher C.** ITRF 2005: a new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth orientation parameters // J. Geophys. Res., 2007, v. 112, B09401.
- Apel E.V., Burgmann R., Steblov G., Vasilenko N., King R., Prytkov A.** Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling // Geophys. Res. Lett., 2006, v. 33, L11303.
- Argus D.F., Gordon R.G.** Test of the rigid-plate hypothesis and bounds on intraplate deformation using geodetic data from the very long baseline interferometry // J. Geophys. Res., 1996, v. 101, p. 13.555—13.572.
- Boucher C., Altamimi Z., Sillard P., Feissel-Vernier M.** The ITRF 2000. IERS Technical Note, 2001, № 31, 270 p.
- Calais E., DeMets C., Nocquet J.-M.** Evidence for a post-3.16-Ma change in Nubia-Eurasia-North America plate motions? // Earth Planet. Sci. Lett., 2003, v. 216, p. 81—92.
- Calais E., Dong L., Wang M., Shen Z., Vergnolle M.** Continental deformation in Asia from a combined GPS solution // Geophys. Res. Lett., 2006, v. 33, L24319.
- Cook D.B., Fujita K., McMullen C.A.** Present day plate interactions in northeast Asia: North American, Eurasian and Okhotsk plates // J. Geodyn., 1986, v. 6, p. 33.
- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F.** Geologically current plate motions // Geophys. J. Int., 2010, v. 181, p. 1—80.
- Fujita K., Cook D., Hasegawa H., Forsyth D., Wetmiller R.** Seismicity and focal mechanisms of the Arctic region and North American plate boundary in Asia // Geol. North Amer. V. L. The Arctic ocean region / Eds. A. Grantz, G.L. Johnson, J.F. Sweeney. Boulder, Geol. Soc. Amer., 1990, p. 77—100.
- Fujita K., Stone D.B., Layer P.W., Parfenov L.M., Koz'min B.M.** Cooperative program helps decipher tectonics of north-east Russia // EOS T. Amer. Geophys. Un., 1997, v. 78, № 24, p. 252—253.
- Fujita K., Koz'min B.M., Mackey K.G., Riegel S.A., McLean M.S., Imaev V.S.** Seismic belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan District, Russia // Stephan Mueller Spec. Publ. Ser., 2009, v. 4, p. 117—145.

- Jin Sh., Park P.-H., Zhu W.** Micro-plate tectonics and kinematics in Northeast Asia inferred from a dense set of GPS observations // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, v. 257, p. 486—496.
- Kogan M.G., Steblov G.M.** Current global plate kinematics from GPS (1995—2007) with the plate-consistent reference frame // *J. Geophys. Res.*, 2008, v. 113, B04416.
- Kogan M.G., Steblov G.M., King R.W., Herring T.A., Frolov D.I., Egorov S.G., Levin V.Y., Lerner-Lam A., Jones A.** Geodetic constraints on the rigidity and relative motion of Eurasia and North America // *Geophys. Res. Lett.*, 2000, v. 27, p. 2041—2044.
- Kreemer C., Holt W.E., Haines A.J.** An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation // *Geophys. J. Int.*, 2003, v. 154, № 1, p. 8—34.
- Kreemer C., Lavalle'e D.A., Blewitt G., Holt W.E.** On the stability of a geodetic no-net-rotation frame and its implication for the International Terrestrial Reference Frame // *Geophys. Res. Lett.*, 2006, v. 33, L17306.
- Mackey G.K., Fujita K., Ruff L.J.** Crustal thickness of Northeast Russia // *Tectonophysics*, 1998, v. 284, p. 283—297.
- Munekane H., Fukuzaki Y.** A plate motion model around Japan // *Bull. Geographical Survey Institute*, 2006, v. 53, p. 35—41.
- Prawirodirdjo L., Bock Y.** Instantaneous global plate motion model 12 years of continuous GPS observations // *J. Geophys. Res.*, 2004, v. 109, B084405.
- Sella G.F., Dixon T.H., Mao A.** REVEL: a model for recent plate velocities from space geodesy // *J. Geophys. Res.*, 2002, v. 107, № B 4, p. 2081.
- Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Takahashi H., Kasahara M., Bormotov V.A., Bykov V.G., Kolo-miets A.G., Gerasimov G.N., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Kato T.** Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS observations // *Geophys. J. Int.*, 2011, v. 184, № 2, p. 529—540.
- Steblov G.M., Kogan M.G., King R.W., Scholz C.H., Burgmann R., Frolov D.I.** Imprint of the North American plate in Siberia revealed by GPS // *Geophys. Res. Lett.*, 2003, v. 30, № 18, p. 1924.
- Stein S., Gordon R.** Statistical tests of additional plate boundaries from plate motion inversions // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1984, v. 69, p. 401—412.
- Zonenshain L.P., Savostin L.L.** Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // *Tectonophysics*, 1981, v. 76, p. 1—45.
- Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Bocharova N.Yu.** Hotfield tectonics // *Tectonophysics*, 1991, v. 199, p. 165—192.

*Рекомендована к печати 15 сентября 2011 г.
Н.Л. Добрецовым*

*Поступила в редакцию 13 мая 2011 г.,
после доработки — 2 сентября 2011 г.*