

УДК 550.34 + 551.24(571.6)

## СВЯЗЬ СЕЙСМИЧНОСТИ С ГЛУБИНЫМ ГЕОЛОГИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМ ПРИАМУРЬЯ И МАНЬЧЖУРИИ

М.А. Губанова, А.М. Петрищевский

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,  
ул. Шолом-Алейхема 4, г. Биробиджан, 679016,  
e-mail: petris@stl.ru, mahaom2008@mail.ru

На основании сопоставления распределений магнитуд и глубин гипоцентров землетрясений с глубинным геологическим строением тектоносферы выявлена и описана зависимость экстенсивности сейсмических процессов от степени жесткости тектонических сред в земной коре и верхней мантии Приамурья и Северо-Восточного Китая, отображаемая в 3D-геологическом пространстве. Распределение магнитуд и плотности землетрясений характеризуется ясно выраженной дискретностью в интервалах глубин: 10–15, 30–60 и 200–220 км. В земной коре и верхней мантии в интервале глубин 20–60 км выявлена линейная зона пониженной сейсмичности, совпадающая с позднемезозойским положением рифтогенной зоны Танлу и сопровождаемая сокращением мощности и уменьшением электрического сопротивления литосферы. В нижнем слое земной коры Среднего Приамурья, в голове Мая-Селемджинским плюма, обнаружена изометричная область пониженной сейсмичности, совпадающая с зонами низких электрических сопротивлений, поглощения сейсмических волн и частичного плавления.

**Ключевые слова:** геодинамика, сейсмичность, тектоника, Приамурье.

### Геологические структуры, сейсмичность, задачи и методика исследования

Исследуемая территория располагается на стыке 4-х литосферных плит: Евразийской, Амурской, Охотомор-

ской и Тихоокеанской, к границам которых приурочены Байкало-Охотский, Сахалинский, Курило-Камчатский и Японский сейсмические пояса. На схемах тектонического районирования выделяют [7, 14] Северо-Азиатский (Сибирский) и Северо-Китайский (Сино-Корейский) кратоны, Центрально-Азиатский палеозойско-мезозойский и Тихоокеанский мезозойско-кайнозойский складчатые пояса. Большая часть исследованной территории располагается в пределах Амурской плиты и Центрально-Азиатского складчатого пояса (рис. 1) и характеризуется признаками современной геодинамической активности [1, 2, 5–8, 10, 14, 18, 19].

Приповерхностный слой земной коры кратонов сложен древними (архейско-протерозойскими) комплексами, в наибольшей степени способными накапливать упругие тектонические напряжения, которые в завершающих фазах разряжаются в форме сейсмических событий. В Центрально-Азиатском складчатом поясе распространены разновозрастные (PZ–MZ) и разнообразные по составу вулканогенно-осадочные комплексы [2, 7, 14]. С резким структурным несогласием с востока к ним примыкают позднепалеозойские и мезозойские структуры Сихотэ-Алинской складчато-надвиговой системы – фрагмента Тихоокеанского складчатого пояса.

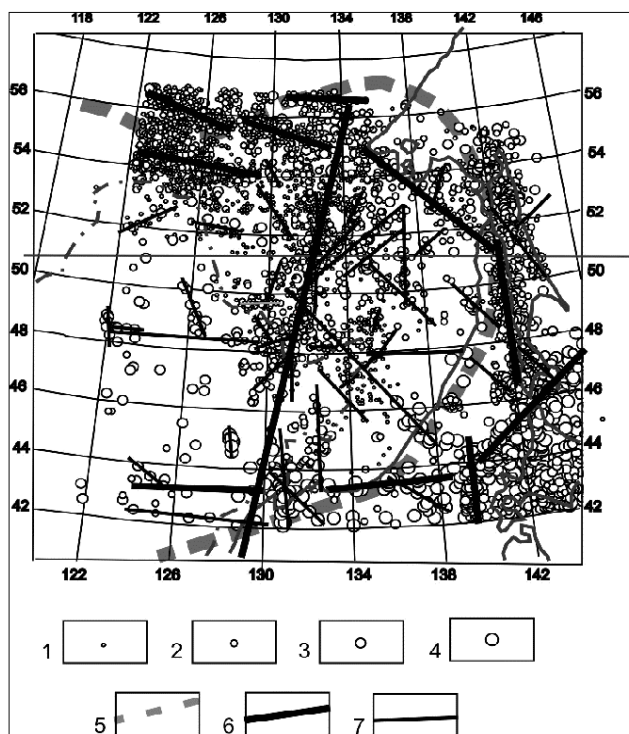
Применяемые обычно методы анализа пространственных закономерностей в расположении землетрясений на территории Приамурья и сопредельных районов сводятся в основном к изучению их связей с разрывной тектоникой. При этом вышеперечисленные протяженные пояса сейсмичности увязываются с глубинными разломами на границах литосферных плит [8, 15], а более мелкие линейные зоны концентрации землетрясений – с разломами более высоких порядков (рис. 2).

Отображения следов сейсмических процессов в разрезах тектоносферы чаще всего ограничиваются иллюстрациями распределений гипоцентров землетрясений в



Рис. 1. Схема геолого-тектонического районирования Приамурья и Северо-Восточного Китая [7]:

1 – границы приповерхностных тектонических структур; 2 – глубинные границы литосферных плит. Обозначения плит: АП – Амурская плита, ТП – Тихоокеанская плита, ОП – Охотоморская плита, САП – Северо-Азиатская плита



**Рис. 2. Сейсмичность Приамурья и Манчжурии [7]:**  
 1 – 4 эпицентры землетрясений с магнитудами 1 – 1,3–1,8;  
 2 – 2,5–3,5; 3 – 3,5–4 с глубиной до 100 км; 4 – 3,5–4 с глубиной  
 больше 100 км; 5 – граница Амурской плиты; 6–7 – разломы  
 на границах плит (5) и внутриплитные (6)

сейсмофокальных зонах с целью обоснования субдукции литосферных плит [1, 2], при этом на вертикальные плоскости разрезов проецируются землетрясения в широких полосах (до 1000 км в плане [1]).

Реализуемый нами подход к изучению геологических причин землетрясений основывается на анализе 3-D моделей полей сейсмичности, которые дают возможность проследить в непрерывном пространстве связь сейсмических событий с объемным геологическим строением исследуемой территории. Исходными данными для рассматриваемых ниже моделей являлись сейсмические каталоги Геофизической службы РАН [18] и КНР [19], дополненные данными региональных сейсмических станций из опубликованных источников. По этим данным был сформирован цифровой 3D-массив  $M(x, y, z)$ , где  $M$  – магнитуды землетрясений;  $x, y, z$  – координаты гипоцентров. С помощью стандартных средств перевода цифровой информации в графические образы (Sufer-8) и вспомогательного интерфейса Глаголева-Петрищевского [4] был составлен комплект карт-срезов распределений магнитуд землетрясений (примеры показаны на рис. 4 и 6) и глубин залегания их гипоцентров (примеры на рис. 5), анализ которых позволил обнаружить новые закономерности и особенности связей сейсмических процессов с глубинным геологическим строением Приамурья и Северо-Восточного Китая.

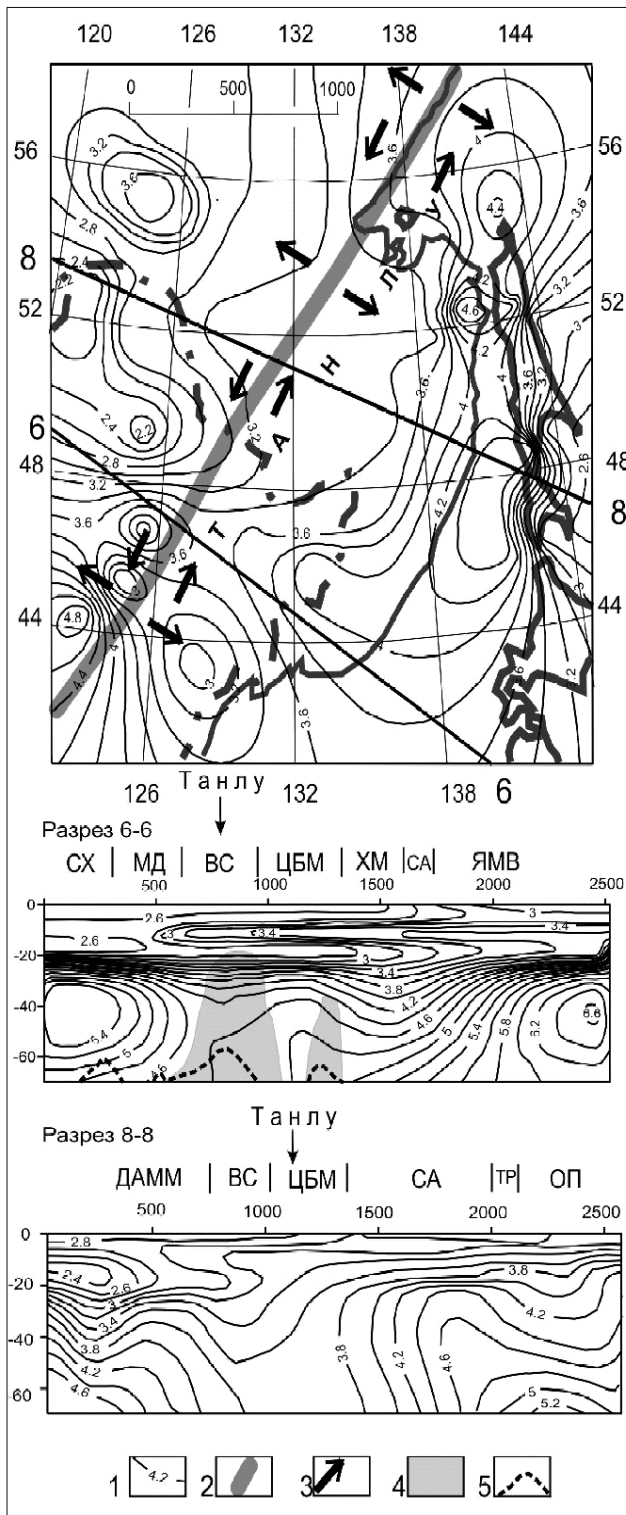
#### **Распределения магнитуд землетрясений в земной коре и верхней мантии**

В полученной модели поля сейсмичности  $M(x, y, z)$  магнитуды и пространственное положение гипоцентров

землетрясений в Приамурье характеризуются ясно выраженной дискретностью. В разрезах тектоносферы регистрируется 3 слоя повышенной сейсмичности: первый – в средней части коры в интервале глубин 10–15 км с магнитудами 2,8–3,4; второй – в интервале глубин 30–60 км, где гипоцентры землетрясений с магнитудами от 4 до 6 распределены неравномерно, а третий слой в интервале глубин 200–220 км с магнитудами от 5,6 до 6,0 на рассматриваемой территории представлен редкими землетрясениями, сосредоточенными преимущественно вдоль восточной границы Амурской плиты и северного фланга Северо-Китайского кратона. Повышенные и высокие магнитуды землетрясений характеризуют более жесткие тектонические среды в земной коре и верхней мантии, а низкие – менее жесткие (менее вязкие).

По полученным данным (рис. 3), в верхнем слое земной коры (интервал глубин 0–24 км) четко различаются 2 сейсмические зоны: западная и восточная. Восточная зона приурочена к границе Амурской и Охотоморской литосферных плит и совпадает с Сахалинским сейсмическим поясом, а западная располагается во внутренних районах Амурской плиты. Области повышенной сейсмичности (осредненные магнитуды 3,8–4,5) разделяются линейной зоной пониженной коровой сейсмичности ( $M=3-3,2$ ). На территории Российского Приамурья эта зона совпадает с Хингано-Охотским позднемеловым вулканоплутоническим поясом [2], однако в его пределах проявлен и кайнозойский базальтоидный магматизм [3], что вполне объясняет низкие электрические сопротивления в нижнем слое земной коры и подкоровом слое верхней мантии этой зоны [7]: здесь, в этом диапазоне глубин, в вязком (полурасплавленном) состоянии могут находиться магматические очаги – источники излияния вулканических магм. В разрезе, по данным магнито-теллурических зондирований (МТЗ), асейсмичная зона отмечается понижением электрических сопротивлений и поднятием астеносферы до глубины 60–65 км от поверхности Земли (рис. 3 Б). А в тепловой модели [6] вязкие, частично расплавленные, астеносферные линзы, образующие цепочку, вытянутую вдоль оси зоны низкой сейсмичности, залегают на глубине 50–75 км.

Имеющиеся и полученные данные дают основание предположить, что обнаруженная зона пониженной сейсмичности имеет отношение к сдвиговым и рифтогенным процессам во взаимосвязанной системе разломов, магматических проявлений и впадин зоны Танлу, пространственное положение которой разными исследователями трактуется неоднозначно [5, 7, 12, 16, 17]. Заметим, что некоторые из них [5] проводят ось зоны по Хингано-Охотскому вулканоплутоническому поясу, как это показано на рис. 3 А в нашей статье. По предположению одного из авторов этой статьи, широкая сдвигово-раздвиговая зона Танлу является ареной длительного проявления тектоно-магматических и соответственно геодинамических процессов – структурой длительного развития, которая в позднем мезозое проявилась как структура растяжения с образованием впадины Сунляо на южном отрезке и Хингано-Охотского вулканического пояса – на северном, а в кайнозой – как сдвиговая зона [16, 17],



**Рис. 3. Распределение магнитуд землетрясений в слое 0–24 км (А) и разрезах (Б) тектоносферы Приамурья и Манчжурии:**

1 – изолинии осредненных магнитуд землетрясений; 2 – ось зоны Танлу; 3 – направления смещений блоков, в зоне Танлу; 4 – зона низких электрических сопротивлений [7]; 5 – кровля астеносферы [7]. Обозначения структур над разрезами: массивы: МД – Дягдачи, ЦБМ – Центрально-Буреинский, ХМ – Ханкайский, ДАММ – Дягдачи-Аргуно-Мамыньский; складчатые системы: СХ – Северо-Хинганская, СА – Сихотэ-Алинская; впадины: ВС – Сунляо; ЯМВ – Япономорская; ОП – Охотоморская плита; ТР – Татарский рифт

близкая по типу развития к трансформным Илань-Итунскому и Сихотэ-Алинскому сдвигам [2, 7]. Сравнение местоположения впадин, вулканических структур и разломов в зоне Танлу с ее глубинными геоэлектрическими, термометрическими и сейсмологическими (рис. 3) характеристиками, а также с мощностью земной коры [7] приводит к предположению о миграции в этой зоне активных тектоно-магматических (рифтогенных, вулканических и сдвиговых) процессов в восточном направлении. Похожие признаки имеют место в Охотско-Чукотском рифтогенном вулканическом поясе [12]. В приводимых моделях (рис. 3–4) мезозойскому положению зоны Танлу соответствует широкая линейная зона пониженной сейсмичности.

Подкоровый слой верхней мантии Центрально-Азиатского складчатого пояса ниже глубины 35–40 км характеризуется переменными реологическими свойствами, что находит отражение в распределении магнитуд землетрясений. Под Северо-Хинганским поясом, Дягдачи-Аргуно-Мамыньским и Дягдачи массивами (террейнами) располагаются жесткие, сейсмически активные блоки верхней мантии, а под Центрально-Буреинским и Ханкайским массивами – менее жесткие, свидетельствующие о переработке литосферы этих структур мезозойскими тектоно-магматическими процессами, на что уже обращали внимание некоторые исследователи [9]. Жесткая литосфера Охотоморской плиты, выраженная увеличением магнитуд землетрясений в разрезах (рис. 3 Б), подвинута под Сихотэ-Алинскую складчато-надвиговую систему на расстояние порядка 1000 км, вплоть до восточных границ Цзямусы-Буреинского и Ханкайского кратонных террейнов. Судя по распределению магнитуд землетрясений (рис. 3 Б), послемiocеновые рифтогенные процессы на территории современного Японском моря охватывают только коровый диапазон глубин. В верхней мантии, в интервале глубин 30–70 км, магнитуды землетрясений увеличиваются по направлению к наклонной поверхности субдицирующей Тихоокеанской плиты (разрез 6–6 на рис. 3).

Распределение магнитуд землетрясений в среднем слое земной коры (интервал глубин 8–10 км, рис. 4 Б), совпадающим по глубине залегания с «гранитно-метаморфическим» комплексом, в общих чертах повторяет особенности поля сейсмичности, относимого ко всему верхнему слою коры (рис. 3 А). Сейсмичность приповерхностного слоя (рис. 4 А) характеризуется увеличением магнитуд с востока на запад. Наиболее резкое увеличение осредненных магнитуд (от 3 до 4,5) наблюдается в зоне Сахалинского сейсмического пояса. По-видимому, такое распределение магнитуд отражает реологические свойства (степень жесткости) приповерхностного слоя земной коры, характеризующегося направленным омоложением структурно-вещественных комплексов с запада на восток. Локальные осложнения общей закономерности тоже вполне объясняются связью сейсмичности со степенью жесткости тектонических сред: уменьшение магнитуд землетрясений наблюдается во впадине Сунляо, а увеличение – в Буреинском и Алданно-Становом блоках кратонного типа (рис. 4 А).

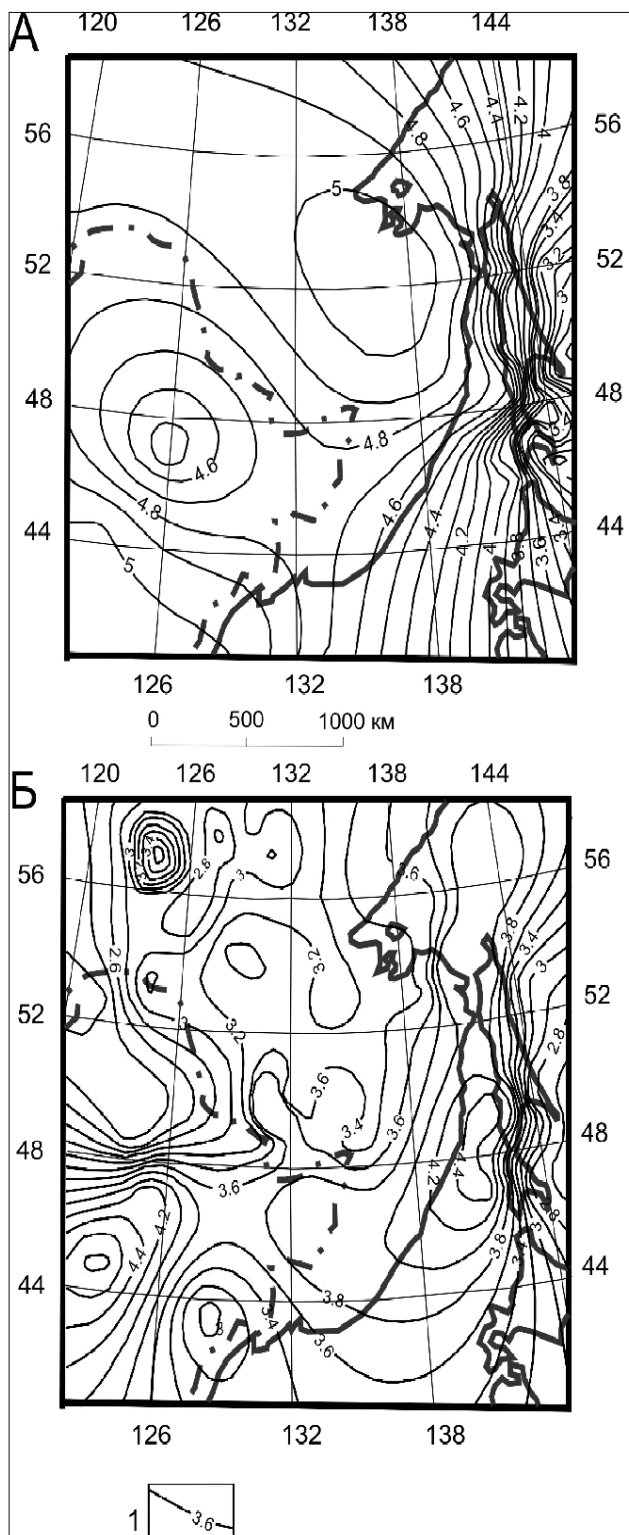


Рис. 4. Распределение магнитуд землетрясений в интервалах глубин (а) 0–5 км и 8–10 км (б):

1 – линии равных значений осредненных магнитуд

В верхнем слое земной коры до глубины 16 км выявлено закономерное увеличение залегания глубины гипоцентров с юга на север (рис. 5), что может быть связано с плавным погружением кристаллического фундамента Северо-Китайского кратона под Центрально-Азиатский складчатый пояс. Погружение сейсмических (и вероятных – тектонических) поверхностей под Алдано-Стано-

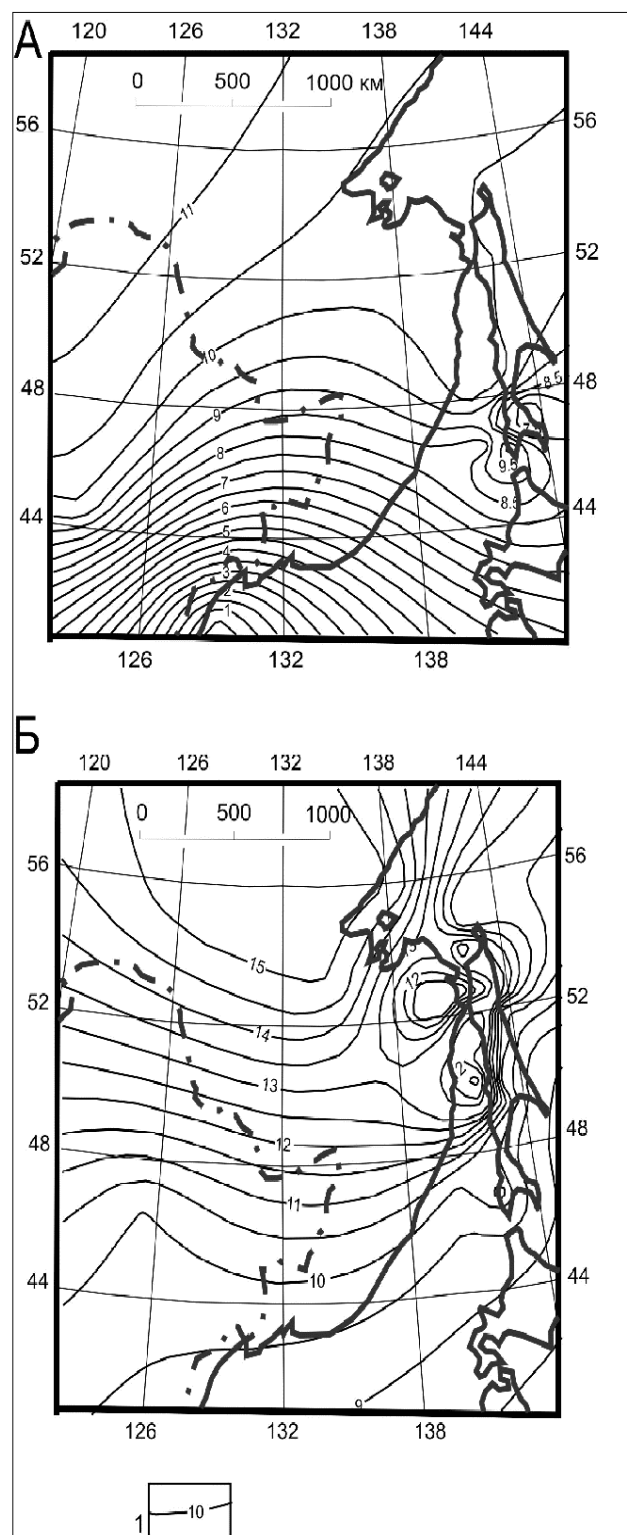


Рис. 5. Распределения глубин гипоцентров в слоях 0–10 км (А) и 10–16 км (Б) от поверхности Земли:

1 – изолинии глубин гипоцентров, км

вой щит может рассматриваться в качестве признака субдукции Амурской плиты под Северо-Азиатский кратон. Этот вопрос, выходящий за рамки нашего исследования, требует специального изучения.

В результате 3D-анализа сейсмических данных в нижнем слое земной коры Среднего Приамурья (интервал глубин 30–40 км) обнаружена относительно менее сейс-

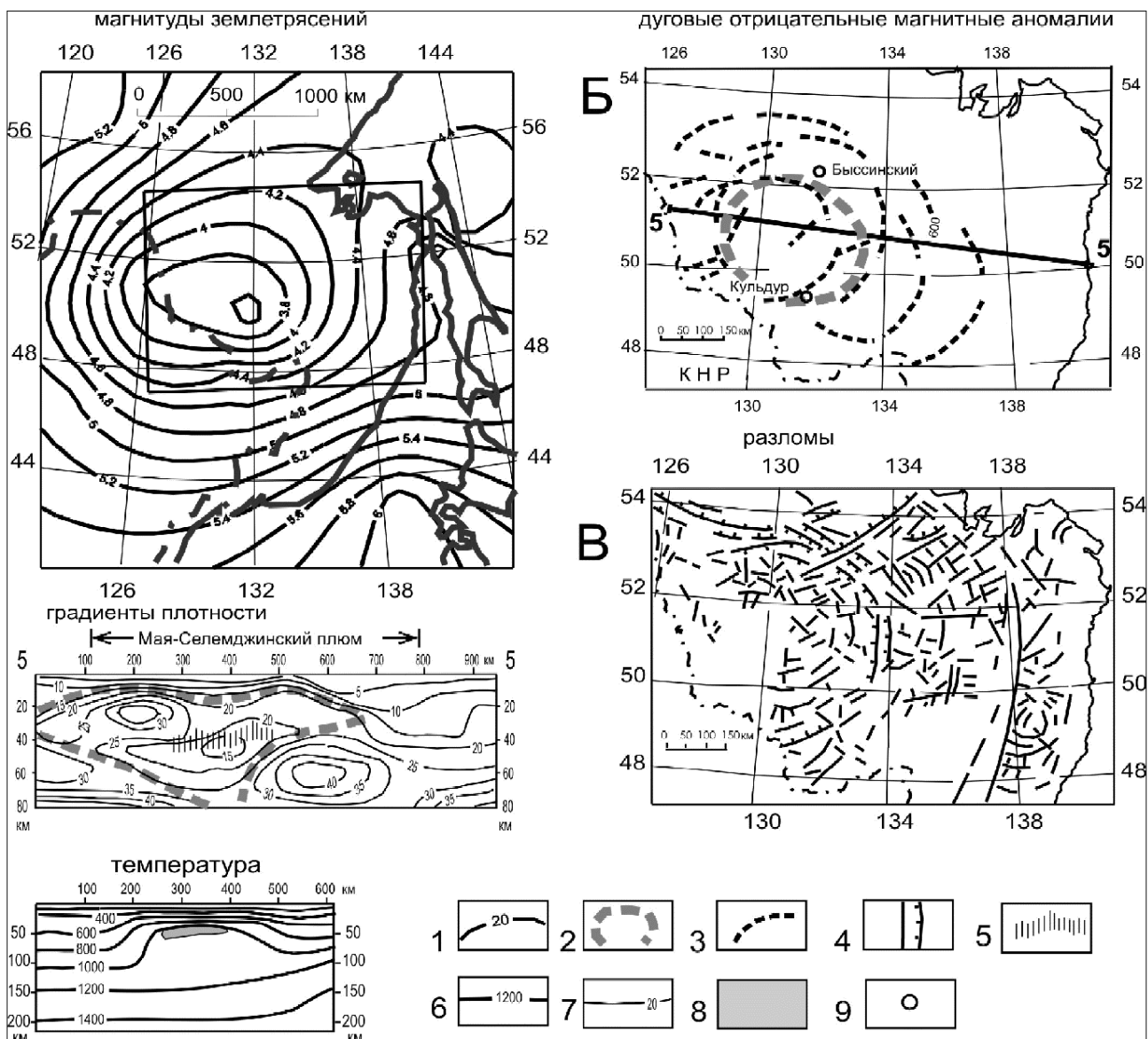


Рис. 6. Магнитуды землетрясений (А), дуговые отрицательные магнитные аномалии (Б), разломы (В) и разрезы (Г, Д) головы Мая-Селемджинского плюма [11]:

1 – изолинии магнитуд (А); 2 – контуры головы плюма в горизонтальных (Б) и вертикальном (Г) сечениях; 3 – дуговые отрицательные магнитные аномалии на схеме (Б); 4 – разломы; 5 – зона низких скоростей сейсмических волн в разрезе (Г); 6 – изотермы, °С в разрезе (Д); 7 – изолинии градиента сферической плотности в разрезе (Г); 8 – зона частичного плавления в разрезе (Д); 9 – термальные источники на схеме (Б)

мичная изометричная область (рис. 6 А), которая совпадает с положением центральной части Мая-Селемджинского плюма, где вязкая, частично расплавленная, астеносфера приближается к поверхности Земли до глубины 50 км. Эта зона сопровождается концентрическим расположением разломов (рис. 6 В), магнитных аномалий (положительных в центре и дуговых отрицательных на периферии), концентрическим расположением аномалий градиентов плотности в интервале глубин 10–30 км, понижением скорости сейсмических волн и частичным плавлением переходного слоя «кора-мантия» [11]. Таким образом, проведенными исследованиями определен еще один признак (отрицательная аномалия сейсмичности) существования глубинной корово-мантийной структуры центрального типа (головы плюма) в Среднем Приамурье.

### Выводы

В результате анализа 3D-модели поля сейсмичности Среднего Приамурья и прилегающих районов Северо-Восточного Китая получена дополнительная информация о закономерностях пространственного распределения гипоцентров землетрясений и их магнитуд и связи сейсмичности с глубинным геологическим строением исследованной территории:

1. Распределение магнитуд землетрясений в тектоносфере характеризуется здесь четко выраженной дискретностью. Обособляются 3 слоя повышенной сейсмичности в интервалах глубин: 10–15, 30–60 и 200–220 км.

2. В земной коре и подкорвом слое верхней мантии до глубины 60 км выделяются две зоны повышенной сейсмичности: западная и восточная, которые разделяются линейной областью пониженной сейсмичности, совпа-

дающей с мезозойским положением зоны Танлу.

3. В верхнем слое земной коры до глубины 16 км обнаружено закономерное увеличение залегания глубины гипоцентров с юга на север, что может быть связано с погружением кристаллического фундамента Северо-Китайского кратона под Центрально-Азиатский складчатый пояс и субдукцией Амурской плиты под Евразийскую.

4. В верхнем слое земной коры (интервал глубин 0–5 км) обнаружена тенденция плавного увеличения магнитуд землетрясений с востока на запад, обусловленная геологическими свойствами слагающих его структурно-вещественных комплексов.

5. Обнаружена связь изометричной зоны пониженной сейсмичности в нижнем слое земной коры Средне-Приамурья с Мая-Селемджинским плюмом.

6. С помощью анализа 3D-модели поля сейсмичности Приамурья и Манчжурии получены убедительные доказательства связи экстенсивности сейсмических процессов, выраженные в распределениях гипоцентров и магнитуд землетрясений, с геологическими характеристиками (электрическим сопротивлением, скоростью сейсмических волн и температурой) тектонических сред, что дает основание для использования реализованного метода при оценках степени их жесткости (или вязкости) в других районах, слабо изученных геофизическими методами.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бормотов В.А. Геодинамическая модель развития сейсмической активности в Приамурье // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Сибири: Докл. науч. симпоз. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2010. С. 71–76.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
3. Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. Масштаб 1:2 500 000 / гл. ред. Л.И. Красный, Пэн Юнь Бяо. Л.: ВСЕГЕИ, 1999. 135 с.
4. Глаголев В.Н., Петрищевский А.М. Простой алгоритм построения разрезов с использованием 3D-массивов геолого-геофизической информации (Юго-Восток России) // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 4, № 3. С. 78–85.
5. Горкуша С.В., Онухов Ф.С., Корчагин Ф.Г. Сейсмичность и неотектоника юга дальнего Востока // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18, № 5. С. 61–68.
6. Горнов П.Ю. Тепловое поле области сопряжения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского складчатых поясов и смежных окраин Сибирской и Северо-Китайской платформ: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2010. 28 с.
7. Диденко А.Н., Каплун В.Б., Малышев Ю.Ф. Глубинное строение и металлогения Восточной Азии. Владивосток: Дальнаука, 2010. 332 с.
8. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Николаев В.В., Семенов Р.М. Буферные сейсмогенные структуры между Евразийской и Амурской литосферными плитами на юге Сибири // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22, № 6. С. 55–61.
9. Малышев Ю.Ф., Брянский Л.И., Карсаков Л.П., Петрищевский А.М., Шевченко Б.Ф. Глубинное строение срединных массивов северо-востока Азии и их роль в формировании континентальной окраины // Тихоокеанская геология. 1983. № 3. С. 27–34.
10. Морозова Л.И. Спутниковый мониторинг землетрясений. Владивосток: Дальнаука, 2005. 136 с.
11. Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. Реология и металлогения Мая-Селемджинского плюма // Доклады РАН. 2011. Т. 440, № 2. С. 207–212.
12. Петрищевский А.М. Отражения рифтогенных структур в гравитационных моделях Северо-Востока Азии // Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии: материалы Всерос. конф. 12–15 сентября 2011 г. Хабаровск. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2011. С. 298–301.
13. Степашко А.А. Глубинные основы сеймотектоники Дальнего Востока: Приамурская и Приморская зоны // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30, № 1. С. 3–15.
14. Тектоническая карта области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов масштаба 1:1 500 000 / ред. Л.П. Карсаков, Чжао Чуньцин, Ю.Ф. Малышев, М.В. Горшков. Владивосток-Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2005.
15. Тектоника, геодинамика и металлогения территории республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука / Интерпериодика», 2001. 571 с.
16. Ge Lin and Yanghuang Wang. The P-wave velocity structure of the crust-mantle transition zone in the continent of China // Journ. Geophys. And Engineering. 2005. No. 2. Pp. 268–276.
17. Shaocheng Ji, Qian Wang, Matthew H. Salisbary. Composition and tectonic evolution of the Chinese continental crust constrained by Poisson ratio // Tectonophysics. 2009. Vol. 463. Pp. 15–30.
18. <http://ceme.gsras.ru>
19. World Data Center for Seismology. Beijing. <http://219.143.71>.

*At the comparison of magnitudes and the depth earthquake distributions with a deep geological structure the dependence of extensiveness of seismic processes on the tectonic media rigidity in the crust and upper mantle of the Priamurie and Northeast China is revealed and described in the 3D-space. Distribution of magnitudes and a density of earthquakes is characterized by clearly expressed discrete-type behavior in intervals of depths: 10–15, 30–60 and 200–220 km. In the earth's crust and upper mantle in the depth interval of 20–60 km the linear zone of lowered seismicity coinciding with the Mesozoic position of the Tanlu rift zone, zones of lowered electric resistance and lithosphere thickening has been established. Isometric anomaly of lower seismicity in the Middle Amur Area into the low crust layer within the Maya-Selemdzha Plume Head is revealed. This anomaly coincides with the low electric resistance, absorption of seismic waves, and partial melting zones.*

**Key words:** Geodynamics, seismicity, tectonics, Russian Amur Area, Northeast China.