

УДК 551.24:550.34

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСЕЙСМ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ МИКРОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА СИСТЕМЫ РАЗЛОМОВ ТАН-ЛУ

Рябинкин К.С., Пупатенко В.В.

ФГБУН «Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина»

Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, e-mail: kostya-rowan@mail.ru

Представлены результаты полевых высокоточных сейсмологических наблюдений на северо-восточном замыкании региональной системы разломов Тан-Лу. Для регистрации микроземлетрясений и исследования спектров сейсмических шумов выбран временный пункт наблюдений на большом удалении от промышленных источников шумов, оборудованный широкополосной сейсмической станцией REF TEK с частотой опроса 200 Гц. В течение 10 дней в радиусе 75–360 км от пункта наблюдений зарегистрировано 21 сейсмическое событие, при средней регистрации стационарной сетью сейсмологических станций ГС РАН 1–5 события в месяц. На основе математических методов статистики и корреляционного анализа определена умеренная корреляция уровня микросейсмических шумов и ветровой нагрузки, а также отсутствие значимой корреляции уровня шумов и других метеопараметров. На основе физической природы затухания сейсмических упругих волн построена предварительная модель сейсмической анизотропии среды.

**Ключевые слова:** высокоточные сейсмические наблюдения, слабые землетрясения, анизотропия среды, система разломов Тан-Лу, микросейсмический шум, спектрально-временной анализ

## SPECTRAL ANALYSIS OF THE MICROSEISMIC NOISE AND MICROEARTHQUAKE SPATIAL MODEL ON THE NORTHEAST PART OF THE TANG LU FAULT SYSTEM

Ryabinkin K.S., Pupatenko V.V.

Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,

Khabarovsk, e-mail: kostya-rowan@mail.ru

In this paper the results of high-quality in situ seismic observations on the northeast part of Tang Lu regional fault system are presented. The temporal seismic station equipped with REF TEK broadband seismometer and 200 Hz data logger was installed far away from urban noise sources. 21 local earthquakes with 75–360 km epicentral distances were recorded in 10 days while stationary seismic network records only 1–5 events per month on the average. The moderate correlation between microseismic noise level and wind load was found using methods of mathematical statistics and correlation analysis, as well as absence of significant correlation between microseismic noise level and other meteorological parameters. The preliminary model of media seismic anisotropy based on the physical nature of seismic wave attenuation was developed.

**Keywords:** high-quality seismic observations, weak earthquakes, media anisotropy, Tang Lu fault system, seismic background noise, spectral-temporal analysis

Сейсмологические методы используют для регистрации упругие колебания, вызываемые землетрясениями и техногенными воздействиями на геологическую среду, и составляют основу контроля напряженно-деформированного состояния горных пород [4].

За инструментальный период наблюдений с 1963 г. ( $\approx 60$  лет) на территории северо-восточного замыкания системы разломов Тан-Лу зарегистрировано около 650 землетрясений магнитудой  $M \geq 2$ , то есть ежегодно регистрируется около 10 событий, или одно событие в месяц, при которых выделяется энергия порядка  $10^9$  Дж.

Высокий сейсмический потенциал данной области определяется сильными землетрясениями, которые произошли здесь в конце XIX и начале XX веков: (23.08.1888 г.,  $M 5,5$ ,  $134^\circ$  В.Д.,  $50^\circ$  С.Ш.; 23.12.1914 г.,  $M 6$ ,  $139,8^\circ$  В.Д.,  $52,5^\circ$  С.Ш.; 11.03.1924 г.,  $M 5,6$ ,

$139,7^\circ$  В.Д.,  $51,2^\circ$  С.Ш.). Имеются сведения о трех исторических землетрясениях с магнитудами  $M > 6$  (900 г.,  $M 6,3$ ,  $134,15^\circ$  В.Д.,  $50,85^\circ$  С.Ш.; 1490 г.,  $M 6,5$ ,  $134,22^\circ$  В.Д.,  $50,53^\circ$  С.Ш.; 1500 г.,  $M 6,1$ ,  $134,22^\circ$  В.Д.,  $50,53^\circ$  С.Ш.). За инструментальный период зарегистрировано также одно сейсмическое событие с магнитудой  $M = 5,5$  и координатами эпицентра ( $135,1^\circ$  В.Д.;  $51,1^\circ$  С.Ш.), произошедшее 29.08.1970 г.

Высокая сейсмическая активность в историческом прошлом на юго-западе области в виде 8-балльной зоны и современная активность на востоке, в виде 8–9-балльной меридиональной зоны, поставили ряд актуальных задач по определению реальной сейсмической опасности в ее центральной части. Согласно современным сеймотектоническим представлениям северо-восточная область системы разломов Тан-Лу

относится к зоне 7–8-балльных сотрясений. Детальная схема активных разломов района исследований и прилегающих территорий, составленная коллективом авторов [1], показана на рис. 1, а.

За период наблюдений с 1970 г. за сейсмичностью региона данную область можно представить в виде области сейсмического затишья. Однако это может быть связано с достаточно редкой сетью стационарных сейсмических станций [3], расположением станций в населенных пунктах с высоким уровнем промышленных шумов, что приводит к многочисленным пропускам сейсмических событий.

Одним из способов преодоления указанных трудностей является организация сезонных полевых сейсмологических наблюдений в пунктах, удаленных от промышленных объектов, с использованием современной цифровой широкополосной аппаратуры.

В данной работе для анализа использованы результаты регистрации слабых землетрясений вблизи озера Удыль [4], на северо-восточном замыкании системы разломов Тан-Лу. Выбор места регистрации и современной аппаратуры позволил получить новые данные о распределении эпицентров слабых землетрясений, на основании которых построена предварительная модель затухания упругих волн в системе активных разломов.

Сейсмические наблюдения проводились в течение 10 дней с 23 июля по 1 августа 2014 г. вблизи оз. Удыль (Ульчский р-н Хаба-

ровского края). Используемое оборудование включало цифровой регистратор с непрерывной записью REF TEK-130 и широкополосный сейсмометр REF TEK 150-120.

За время наблюдений в радиусе 360 км было зафиксировано 21 землетрясение, из них 10 сейсмических событий в радиусе 200 км от пункта регистрации (рис. 1, б). Для всех землетрясений были определены значения локальной магнитуды, а для 20 из них также координаты эпицентра по данным одной станции. Для этого были определены значения эпицентрального расстояния и азимута. Четыре землетрясения были достаточно сильными и были уверенно зарегистрированы также на одной или двух стационарных сейсмических станциях, расположенных в п. Ванино, п. Чегдомын, г. Хабаровске и в п. Горный. Это позволило проверить точность определения координат эпицентра по одной станции, которая составила порядка 40 км, что может считаться приемлемым результатом.

#### Результаты сейсмологических наблюдений

Уровень микросейсмического шума в районе пункта наблюдений позволил регистрировать сейсмические события с магнитудой  $M < 2$ . На рис. 2 приведены кривые спектральной плотности мощности (СПМ) для X-канала (ориентированного на север), соответствующие значениям вероятности 5, 50 и 95 % за все время наблюдений.

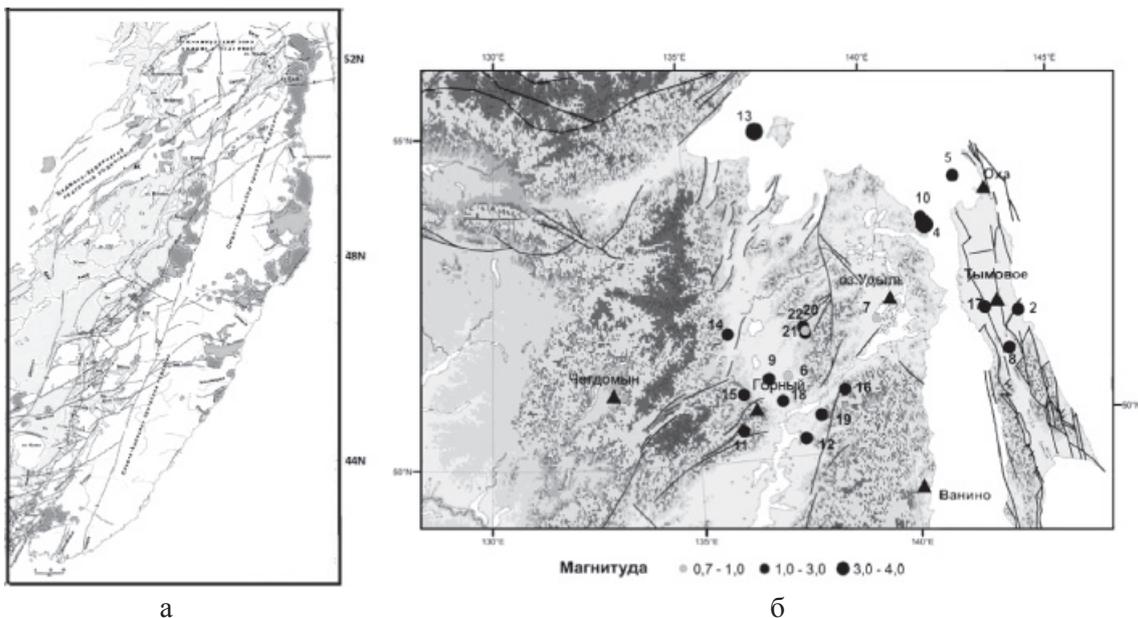


Рис. 1. а – схема активных разломов района исследований и прилегающих территорий;  
 б – эпицентры зарегистрированных землетрясений  
 и основные тектонические нарушения района исследования

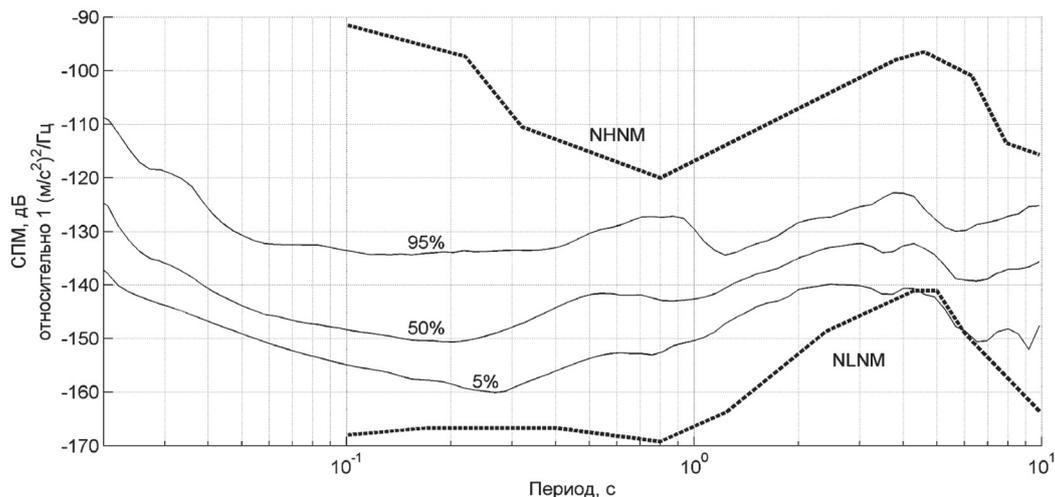


Рис. 2. Спектральные плотности мощности для X-канала, соответствующие значениям вероятности 5, 50 и 95%, а также модели шума NLNM и NNNM

Также на рис. 2 приведены модели низкого (NLNM) и высокого (NNNM) шума, согласно общепринятой в настоящее время модели из работы [9]. В диапазоне периодов регистрации слабых землетрясений (0,06–0,5 с, частоты 2–16 Гц) медианный уровень микросейсмического шума на 18–25 дБ выше модели NLNM и значительно ниже модели NNNM (необходимо отметить, что указанные модели ограничены минимальным периодом 0,1 с).

Из-за большой удаленности пункта наблюдений от промышленных и транспортных объектов, да и в целом от населенных пунктов, антропогенная составляющая в микросейсмическом шуме практически отсутствовала. В интересующем нас диапазоне периодов наиболее существенным фактором, влияющим на уровень шума, по-видимому, являлся ветер и вызванные им волновые явления на поверхности озера. Кроме того, влияние могут оказывать и другие метеорологические параметры. Метеорологических измерений непосредственно вблизи пункта наблюдений не велось, ближайшая метеостанция находилась в п. Богородское (40 км к северо-востоку). Данные по силе ветра, температуре воздуха и атмосферному давлению, полученные на этой метеостанции, были взяты из архива погоды в Богородском, с сайта [http://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Богородском](http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Богородском) (01.08.2016) и приведены на рис. 3, б. Дискретность указанных измерений составляет 3 часа.

Было проанализировано изменение во времени среднего значения СПМ на частотах 2–16 Гц (рис. 3, а). Для этого были рассчитаны значения СПМ через каждые две

минуты. Полученные значения для устранения коротких случайных флуктуаций, в т.ч. вызванных влиянием сейсмических волн слабых землетрясений, были отфильтрованы скользящим медианным фильтром. Каждый отсчет был заменен на медианное значение 41 соседнего отсчета (т.е. 20 до и 20 после текущего). Таким образом, из ряда значений были исключены вариации короче 80 минут.

Из рис. 3 следует, что некоторые временные отрезки повышенного уровня шума совпадали с повышением силы ветра. Наиболее ярко это проявляется в диапазонах 204,5–208,5 и 212–213 суток. Проведенный корреляционный анализ показал наличие в среднем умеренной корреляционной зависимости между средним значением СПМ и скоростью ветра. Нормализованный коэффициент корреляции составил 0,396, а вероятность, что эта корреляция случайна – 0,06%.

В то же время значимой корреляции между уровнем шума, с одной стороны, и температурой воздуха и атмосферным давлением, с другой стороны, не обнаружено. Полученные коэффициенты корреляции (от 0,11 до 0,16 по модулю) соответствуют очень низкому уровню корреляции, а их надежность не слишком высока – от 64 до 83%.

На рис. 4 показана сейсмограмма одного из землетрясений с магнитудой  $M = 1,1$ .

#### Результаты исследования и их обсуждение

Одной из задач, решаемых высокоточной сейсмометрией, является определение затухания сейсмических волн в различных азимутах и определение анизотропии среды. Для определения анизотропии

применялся анализ отношений амплитуд Р и S-волн. Подразумевалось, что на близких расстояниях (до 300 км) объемные волны от коровых землетрясений регистрируются как прямые, распространяющиеся по законам геометрической оптики. Затухание поперечной S-волны существенным образом зависит от того, вдоль или поперек разломных структур она распространяется. В первом случае затухание будет значительно меньше, чем во втором, поскольку поперечная волна вдоль разломов распространяется как в волноводе.

Соотношение амплитуд Р и S-волн было определено для 19 землетрясений из 21. Амплитуды измерялись в смещениях, в частотном диапазоне 1–20 Гц или более узком, если на некоторых частотах интенсивность шума превышала интенсивность сейсмических колебаний. Полученные значения нанесены на радиальную диаграмму (рис. 5, а). Соотношения амплитуд, полученные в каждом квадранте, были усреднены, после чего был построен эллипс, проходящий через полученные четыре точки (рис. 5, б).

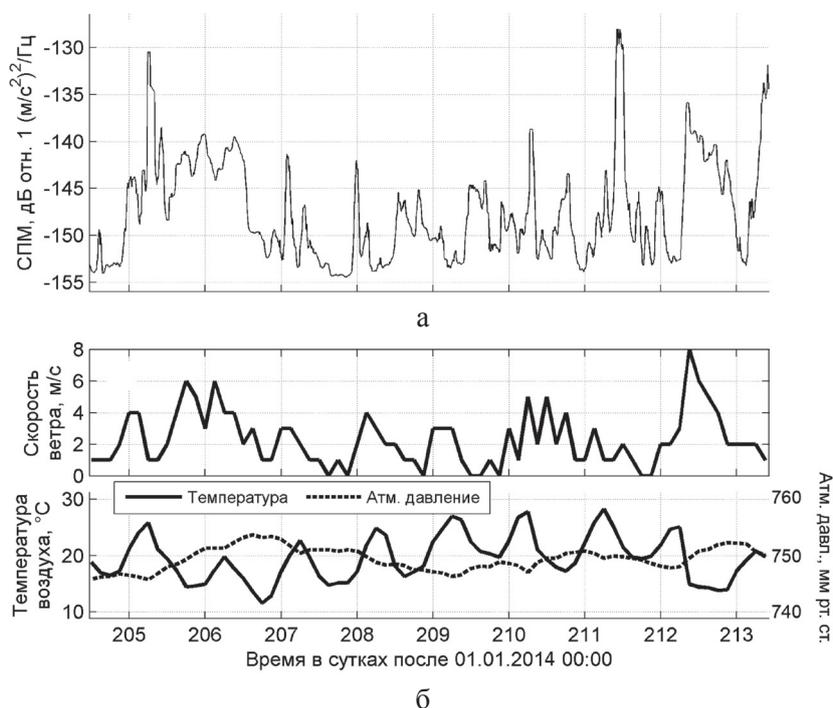


Рис. 3. а – изменение во времени среднего значения спектральной плотности мощности на частотах 2–16 Гц (Х-канал); б – графики изменения скорости ветра, температуры воздуха и атмосферного давления на метеостанции в п. Богородское

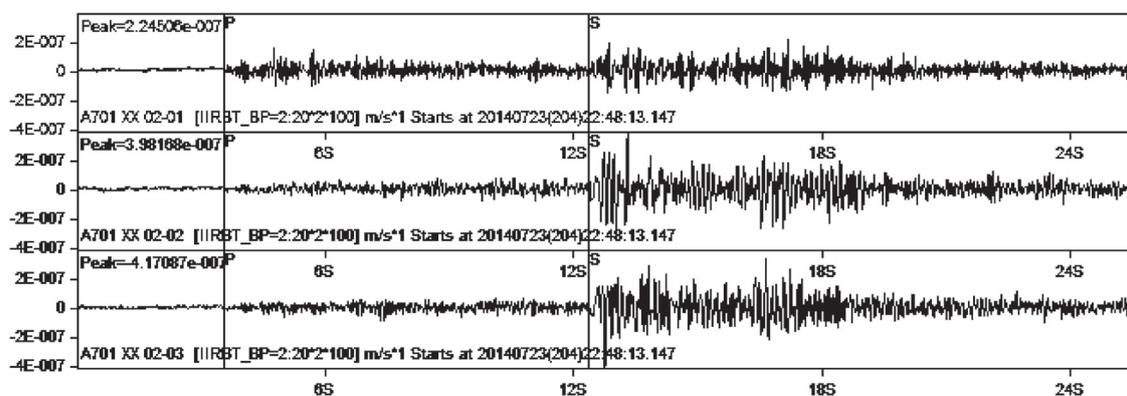


Рис. 4. Сейсмограмма землетрясения с магнитудой  $M = 1,1$ , произошедшего 23.07.2014 г. в 22:48:05 UTC. Сверху вниз показаны вертикальный, северный и восточный каналы. Вертикальными линиями отмечены вступления Р и S-волн

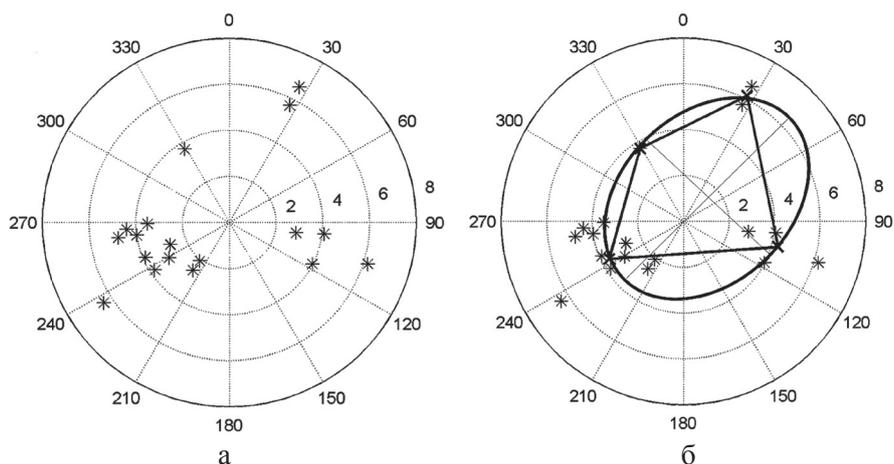


Рис. 5. Отношения амплитуд  $P$  и  $S$ -волн:  
 а – радиальная диаграмма; б – радиальная диаграмма с усреднением по квадрантам (звёздочки, соединенные прямыми линиями) и описанным вокруг полученного четырехугольника эллипсом

Ориентация большой оси полученного эллипса соответствует направлению ЮЗ-СВ. Это хорошо согласуется с пространственной ориентировкой активных разломов районе оз. Удиль (рис. 1, а). Основные тектонические нарушения в этом районе – Лимурчанский и Удильский разломы характеризуются соответственно меридиональным и северо-восточным простираем.

Привлечение материалов по блоковой структуре земной коры, распределению аномалий геофизических полей, сейсмотектоническим реконструкциям полей напряжений по фокальным механизмам и линеаментному анализу цифровых моделей рельефа показало, что северо-восточное простираем главной оси эллипса в среднем азимуте  $45^\circ$  согласуется с пространственной ориентацией сейсмоактивных границ доменов [6], азимутами максимальных деформаций [5], ориентацией осей главных напряжений сжатия [7] и направлением систем линеаментов [10]. Новые данные по ориентации осей сжатия-растяжения [8] и разработанная тектоническая кластерная модель по распределению сильных землетрясений [10] позволяют сделать вывод, что применение описанной методики вполне допустимо для построения модели анизотропии на расстояниях эпицентров землетрясений до 300 км от пункта регистрации при достаточной представительности количества сейсмических событий. Проведение данных работ будет способствовать уточнению сейсмической опасности, что становится актуальным при интенсивном развитии инфраструктуры Дальневосточного региона [2].

Авторы благодарны д.г.-м.н. А.Н. Диденко за методическую помощь в организации полевых наблюдений. Исследование вы-

полнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-05-00097а.

#### Список литературы

- Имаев В.С., Имаева Л.П., Смекалин О.П., Козьмин Б.М., Гриб Н.Н., Чипизубов А.В. Карта сейсмотектоники Восточной Сибири // Геодинамика и тектонофизика. – 2015. – № 6(3). – С. 275–287. DOI:10.5800/GT-2015-6-3-0182.
- Квашук С.В., Колтун П.А. Влияние инженерно-геологических условий горных районов Дальнего Востока на эксплуатацию и реконструкцию транспортных сооружений (на примере жд линии Комсомольск – Советская Гавань) // Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). Дальний Восток-1. – М.: Изд-во «Горная книга», 2009. – № 4. – С. 159–166.
- Левин Б.В., Ким Чун Ун, Нагорных Т.В. Сейсмичность Приморья и Приамурья в 1888–2008 гг. // Вестник ДВО РАН. – 2008. – № 6. – С. 16–22.
- Рябинкин К.С., Пупатенко В.В., Тютюник А.С. Наблюдения за слабыми землетрясениями вблизи оз. Удиль. Результаты и модели // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всероссийская научная конференция с международным участием, Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г. / под ред. Б.В. Левина, О.Н. Лихачевой. – Владивосток: Дальнаука, 2015. – Том 1. – С. 160–163.
- Трофименко С.В., Гильманова Г.З., Никитин В.М., Колодезников И.И. Линеаментный анализ пространственного поля сейсмичности северного сегмента Амурской микроплиты // Наука и образование. – 2016. – № 2 (81). – С. 41–50.
- Трофименко С.В. Тектоническая интерпретация статистической модели распределений азимутов аномалий гравимагнитных полей Алданского щита // Тихоокеанская геология. – 2010. – Т. 29. – № 3. – С. 64–77.
- Трофименко С.В. Тектоническая модель сейсмичности северо-восточного сегмента Амурской плиты в двух фазах вращения Земли // Тихоокеанская геология. – 2016. – Т. 35. – № 6. – С. 38–45.
- Barth A., Wenzel F. New constraints on the intraplate stress field of the Amurian plate deduced from light earthquake focal mechanisms // Tectonophysics. – 2010. – Vol. 482. – № 1. – P. 160–169.
- Peterson J. Observations and modeling of seismic background noise. USGS Open-File Report 93-322 // Albuquerque: U.S. Geological Survey. – 1993. – 94 p.
- Trofimenko S.V., Grib N.N., Melnikov A.A., Merkulova T.V. Systems of Lineaments of Magnetic and Gravity Anomalies in the Zone of Convergent Interaction of the Amur and the Eurasian Tectonic Plates // Modern Applied Science. – 2015. – Vol. 9. – № 8. – P. 195–203.