

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ В КОМПЛЕКСЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕКТониКИ ДРЕВНИХ ПЛАТФОРМ (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ВКМ)

А. И. Трегуб, Р. А. Орлов*

Воронежский государственный университет;

* Лаборатория сейсмического мониторинга Воронежского кристаллического массива
Геофизической службы Российской Академии наук (ЛСМ ВКМ ГС РАН)

Поступила в редакцию 23 сентября 2008 г.

Аннотация: в статье представлены результаты изучения сейсмического шума в пределах территории Воронежского кристаллического массива. Установлена связь сейсмического шума с элементами новейшей тектоники.

Ключевые слова: тектоника, неотектоника, земная кора, литосфера, сейсмический шум, Воронежский кристаллический массив.

Abstract: in article the results of investigation of seismic noise of Voronezh Crystalline Massif territory are presented. The relation between seismic noise and elements of new tectonic are ascertained.

Key words: tectonics, new tectonic, earth crust, lithosphere, seismic noise, Voronezh Crystalline Massif.

Структура древних платформ и, в частности, Восточно-Европейской платформы является интегральным эффектом тектонических движений длительного промежутка времени. Эти движения осуществляются на различных иерархических уровнях и в зависимости от этого имеют различную морфологическую выраженность. Такими уровнями могут быть литосфера в целом, земная кора, слои земной коры, включая кристаллический фундамент и осадочный чехол, разновозрастные структурные этажи осадочного чехла и его структурные подразделения (структурные подэтажи), отмечающие те или иные этапы тектонического развития территории. Иерархические уровни и суммарный возраст структур тесно связаны друг с другом. Наиболее молодым этапом формирования структуры может быть назван неотектонический этап.

Новейшие (неоген-четвертичные [1]) движения в «чистом» виде зафиксированы в приповерхностном неоген-четвертичном структурно-вещественном комплексе. На уровне осадочного чехла Восточно-Европейской платформы в целом новейшие деформации наложены на структуры, формировавшиеся в продолжение фанерозоя. В кристаллическом фундаменте они осложняют структуры, основной этап образования которых завершился в

конце раннего протерозоя. В дальнейшем структура фундамента подвергалась преобразованию рифтогенными процессами авлакогенной стадии развития платформы в позднем протерозое, движениями, связанными с формированием ее осадочного чехла. В земной коре кристаллический фундамент может быть поставлен в соответствие верхнекоровому слою [2], особенностью которого на плитной стадии развития является возможность сохранения складчато-надвиговых структур коллизионного этапа докембрийской истории платформы. Этому способствует в целом слабый тепловой поток, отсутствие мощных динамических воздействий. Главными структурами этого хрупкого слоя являются разломы, разбивающие фундамент на блоки различных размеров. Разломы фундамента территории ВКМ делятся на ряд генераций. Наиболее важными из них являются разломы коллизионной стадии становления континентальной коры в конце раннего протерозоя, разломы авлакогенной стадии развития платформы в позднем протерозое, разломы плитной стадии, обусловленные континентальным рифтогенезом в девоне.

На уровне нижней коры, подверженной более существенному тепловому воздействию со стороны верхней мантии, преобладают, по-видимому, пластические деформации [3], вследствие которых реликтовая структура коллизионной стадии сохра-

няется в существенно меньшей степени. Для нижнекорового слоя Восточно-Европейской платформы возрастает роль тектонических процессов фанерозоя (особенно его наиболее активного девонского этапа, с которым ассоциируются проявления рифтогенеза и основного магматизма). На уровне литосферной (надастеносферной) мантии основным процессом, по-видимому, является постепенное нарастание во времени ее мощности по мере ослабления теплового потока, которое может осложняться периодическим внедрением нижнемантийных плюмов [4].

В соответствии с вышеизложенным может быть рассмотрена систематика важнейших структурных элементов различных иерархических уровней литосферы, а также методов их изучения. На литосферном уровне в целом для территории ВКМ главными структурными формами, по-видимому, являются литосферные складки [5]. На уровне коры это сводово-глыбовые структуры. На уровне верхней коры (кристаллического фундамента), блоковые структуры, связанные с движениями по разломам. Для осадочного чехла важнейшими структурными элементами являются штамповые структуры и области динамического влияния разломов фундамента, представленные парагенезисами пликативных и дизъюнктивных элементов, возникающих на границах штамповых структур при движениях блоков фундамента. Для осадочного чехла важное значение имеет, кроме того, литогенетическая трещиноватость различных рангов, отражающая суммарные палеотектонические напряжения отдельных этапов формирования его структурно-вещественных комплексов [6]. В меньшей степени здесь распространены собственно разломы.

Особенностью новейшего структурно-вещественного комплекса является его тесная связь с рельефом земной поверхности, с экзогенными процессами и структурами, которые при этом могут формироваться. В связи с этим главными методами его изучения являются структурно-геоморфологические методы (морфоструктурный анализ, сопряженный с методами дистанционного зондирования) в совокупности с изучением вещественного состава разновозрастных новейших отложений, составлением структурных карт и карт равных мощностей по данным бурения и описания обнажений. Геофизические методы практически не используются.

Тектоника более древних (палеозойских, мезозойских и кайнозойских) комплексов осадочного чехла изучается, в основном, по данным бурения или описания обнажений, путем составления

структурных карт по опорным горизонтам. Палеотектоническая компонента вычленяется на основе составления и анализа литолого-фациальных и палеогеографических карт в сочетании с картами изопахит. В существенно меньшей степени при этом используются геофизические методы.

Структура фундамента, наоборот, устанавливается, в основном, геофизическими методами (главными из которых являются методы изучения магнитного и гравитационного полей); данные бурения, хоть и имеют важнейшее значение для идентификации аномалий, при картировании уходят на второй план.

Основой изучения коры и литосферы, а также других глубинных оболочек являются сейсмические методы, которые обычно дополняются результатами изучения гравитационного поля. Таким образом, наиболее доступным для изучения во всех деталях оказывается новейший структурно-вещественный комплекс. Эта доступность обеспечивается, прежде всего, широкими возможностями изучения рельефа земной поверхности. Вместе с тем его изучение имеет еще и важное методическое значение, так как результаты исследования неотектоники могут быть использованы для уточнения структурных карт по более древним структурно-вещественным комплексам, поскольку на примере Воронежской антеклизы установлена высокая степень унаследованности новейшего структурного плана от более древних структур и, в особенности, от блоковой структуры фундамента [7]. В этой связи более широкое применение геофизических методов (и в том числе нетрадиционных) для неоструктурного анализа представляется весьма актуальным.

Район исследований расположен на стыке двух крупнейших неотектонических элементов (элементов первого порядка): Среднерусского поднятия и Окско-Донской депрессии [8]. В генетическом отношении на уровне литосферы они могут быть интерпретированы как проявления литосферной складчатости. Эти структурные формы при их субмеридиональной ориентировке соответствуют крупным одноименным формам рельефа и находят свое продолжение за пределами региона. Так, Окско-Донская низменность на севере продолжается Мещерской низиной; Среднерусская возвышенность к северу смыкается с отрогами Московско-Смоленской возвышенности и далее с Валдайской возвышенностью. Еще одна субмеридиональная «волна» фиксируется к востоку от Окско-Донской впадины и выражена Приволжской возвышенностью, сменяющейся к югу возвышенностью Ергеней. Эти «вол-

ны» отчетливо проявлены не только в современном рельефе, но и в аномальном гравитационном поле [9]. Вместе с тем отмеченные структуры, характеризуются отчетливо выраженными разломными ограничениями, что позволяет отнести их к сводово-глыбовым структурам корового уровня [10]. Внутри этих структур выделены элементы более высоких порядков. В генетическом отношении они могут быть отнесены к структурам штампового типа. В пределах исследованной территории непосредственно в неоген-четвертичном структурно-вещественном комплексе их границы выражены пологими флексурами, линейными прогибами, часто осложняющимися локальными впадинами и поднятиями. В большинстве случаев эти парагенезисы отвечают начальным (пликативным) стадиям развития областей динамического влияния разломов [11] и обладают значительной шириной, малой амплитудой и слабой контрастностью движений в их пределах. Штамповые структуры неоген-четвертичного комплекса характеризуются тесной связью с неоднородностями в строении докембрийского основания [10]. Глубина залегания кристаллического фундамента в пределах района исследований изменяется от 600–800 м (на крыльях) до 50 м и менее в присводовой части. В современной структуре фундамента Окско-Донская депрессия сопоставляется с северо-восточной частью Хоперского мегаблока [12], сложенной нижнепротерозойскими флиш-идными образованиями воронцовской серии. В палеоструктуре это интенсивно дислоцированные, осложненные надвигами реликты аккреционной призмы. В пределах изученного участка Окско-Донская впадина представлена Шукавкинским поднятием, расположенным в северо-восточной части Хоперского мегаблока. Его юго-восточная часть сопоставляется с Калачским поднятием и отделяется от северо-восточной части субширотной Суджано-Икорецкой зоной разломов, которая совмещается с осевой линией Потуданского и далее – Масальского линейных неотектонических прогибов. Среднерусское поднятие в фундаменте сопоставляется с мегаблоком КМА, который отличается сложной внутренней структурой, образованной блоками архейской консолидации, разделенными раннепротерозойскими рифтогенными формами.

В осадочном чехле, кроме неоген-четвертичного структурно-вещественного комплекса, могут быть выделены палеозойский и мезо-кайнозойский комплексы со своими тектоническими особенностями. При этом отмечается унаследованность структурно-горного каркаса фундамента в осадочном чехле.

В неотектонике характеризуемой площади наиболее важное значение имеют разломные зоны, сопоставляющиеся с Салтыковским и Кривоборским линейными прогибами, которые ориентированы в субмеридиональном направлении, отделяют Среднерусское поднятие от Окско-Донской депрессии. Образование прогибов происходило в условиях широтного растяжения. Сходными кинематическими параметрами обладает и более молодой (плиоцен-четвертичный) Павловско-Мамонский линейный прогиб на границе Калачского и Острогжского поднятий. Субширотные зоны, выраженные Ливенско-Ефременским прогибом (на границе Трубетчинской и Кшень-Оскольской террас) и Масальским прогибом (ограничивающим с севера Калачское поднятие) имеют сложную инфраструктуру, обусловленную сочетанием локальных впадин и поднятий. Таким образом, наиболее крупные элементы структуры, выделяющиеся в приповерхностном неоген-четвертичном структурно-вещественном комплексе, имеют глубинную природу и прослеживаются как в осадочном чехле, так и в фундаменте; области динамического влияния разломов, выраженные в новейшем структурно-вещественном комплексе линейными структурами, представлены зонами повышенной дезинтеграции пород осадочного чехла и фундамента.

Для изучения связи параметров сейсмического шума с геологическим строением были выбраны наиболее информативные характеристики. Устойчивыми к временным вариациям и мало зависящими от антропогенных помех являются сейсмические колебания в диапазоне частот 0.7–1.4 Гц [13]. Ошибки измерений амплитуды сейсмического сигнала на полевых пунктах не превышают 5–10 %. В 2001–2007 гг. силами сейсмической лаборатории ВКМ ГС РАН в центральной и восточной части Воронежского кристаллического массива на площади более 75 тыс. км² были получены данные о параметрах сейсмического шума в 102 пунктах измерений. Кроме того, измерения, проведенные сейсмостанциями SDAS с датчиками CM3-OC (частотный диапазон 0.02–8.0 Гц) одновременно в двух пунктах – на левом берегу Дона в пределах Окско-Донской депрессии, и на правом берегу, на площади Среднерусского поднятия позволили установить, что уровень спектральных амплитуд в депрессии в 2–3 раза выше, чем на поднятии. Анализ амплитуд сейсмического шума в сочетании с частотой позволяет оценить его распределение по вертикали. Если принять, что микросейсмы в диапазоне частот 0.03–1.3 Гц в основном представлены волнами

Релея, то, используя соотношение $H = K \lambda$, где K числовой коэффициент, близкий к 0.4, а λ длина волны, можно оценить глубину слоя H , определяющего распределение амплитуд [14]. Для территории исследования она оценивается величиной ≈ 1.2 км.

Сопоставляя эти данные с данными по неотектонике и блоковой структуре кристаллического фундамента (рис. 1), можно отметить высокую степень корреляции между аномалиями сейсмического шума (как для вертикальной, так и горизонтальной составляющих) с данными по неоген-четвертичному структурно-вещественному комплексу и блоковой структурой фундамента. При этом учитывая указанную расчетную глубину (1,2 км), можно предположить, что эти аномалии обусловлены интегральным влиянием строения новейшего структурно-вещественного комплекса, осадочного чехла и структурных неоднородностей верхней части кристаллического фундамента. В зависимости от глубины залегания фундамента степень его участия в формировании аномалий может быть различной. Она существенно возрастает в присводовой части антеклизы (район г. Павловска) и снижается на ее крыльях. Различия в свойствах геологической среды, определяющих контуры аномалий, по видимому, связаны с различиями в степени дезинтеграции пород, которая особенно высока на участках, испытывавших значительные динамические воздействия и, в частности, в зонах разломов.

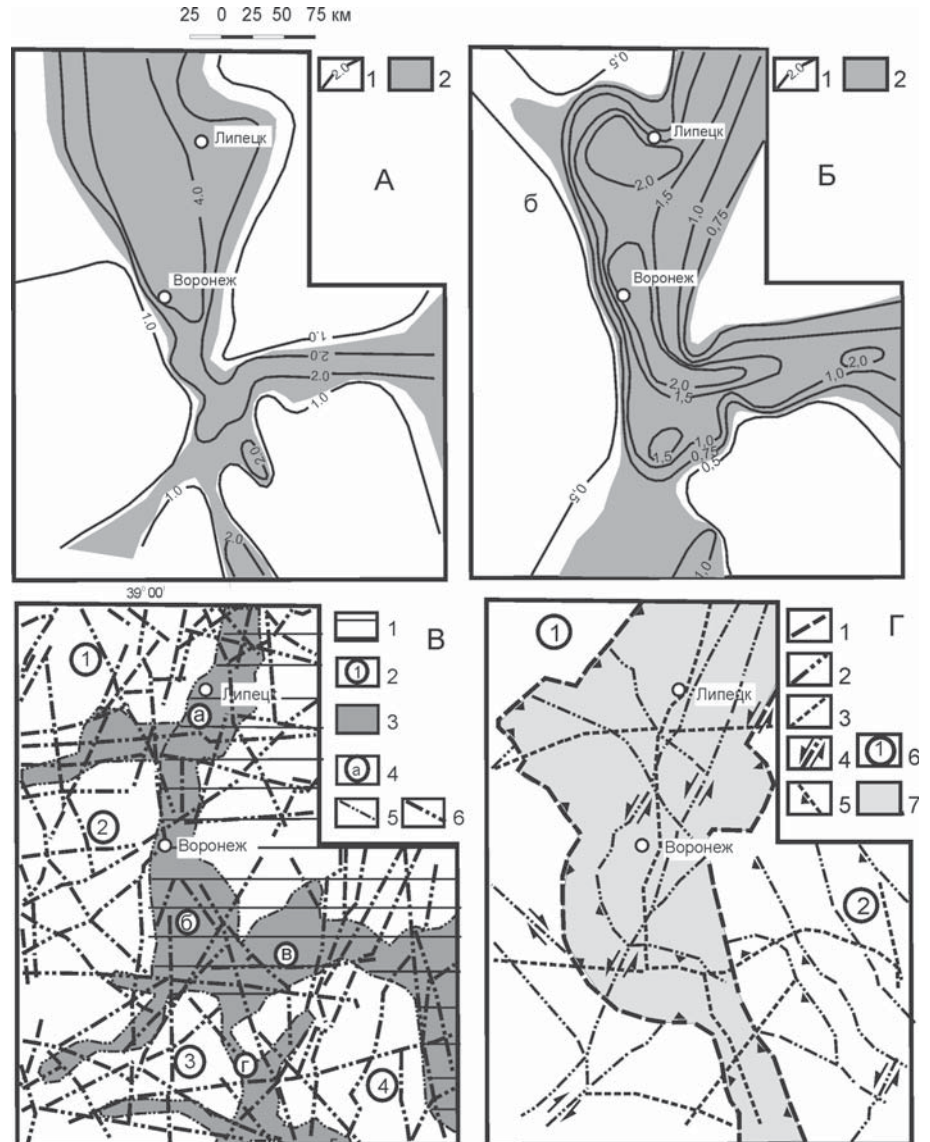


Рис. 1. Соотношение параметров сейсмического шума с элементами неотектоники и блоковой структуры фундамента: А – вертикальная составляющая сейсмического шума в диапазоне частот 0.7 – 1.4 Гц (сост. Р. А. Орлов): 1 – изолинии уровня сейсмического шума, нормированные по уровню в п. Сторожевое, 2 – области anomalously высоких значений сейсмического шума; Б – горизонтальная составляющая сейсмического шума в диапазоне частот 0.7 – 1.4 Гц (сост. Р. А. Орлов): 1 – изолинии уровня сейсмического шума, нормированные по уровню в п. Сторожевое, 2 – области anomalously высоких значений сейсмического шума; В – схема новейшей тектоники (по А. И. Трегубу, 2002 [10]): 1 – Окско-Донская депрессия; 2 – штамповые структуры неоген-четвертичного структурно-вещественного комплекса, цифры в кружках: 1 – Трубетчинская структурная терраса, 2 – Кшень-Оскольская структурная терраса, 3 – Острогжское поднятие, 4 – Калачское поднятие; 3 – линейные прогибы на границах штамповых структур; 5 – Линейные прогибы (цифры в кружках): а – Салтыковский, б – Кривоборский, в – Масальский, г – Павловско-Мамонский; 5 – границы прогибов; 6 – осевые линии зон повышенной литогенетической трещиноватости осадочного чехла; Г – структурная схема кристаллического фундамента (по В. М. Ненахову и др. [12] с доп.): 1 – разломы вдоль границ мегаблоков; 2 – наиболее крупные разломы коллизионного этапа; 3 – постколлизийные разломы, активные на неотектоническом этапе; кинематика разломов: 4 – сдвиги; 5 – надвиги; 6 – мегаблоки фундамента (цифры в кружках): 1 – КМА, 2 – Хоперский; 7 – Лосевская шовная зона

Сравнивая контуры сейсмических аномалий (рис. 1, А и Б) с блоковым строением кристаллического фундамента (рис. 1, Г) можно отметить общее совпадение осей этих аномалий с осевой приосевой частью Лосевской шовной зоны, сформировавшейся в раннем протерозое в процессе коллизии и характеризующуюся в связи с этим значительной степенью раздробленности пород. В значительной степени накладываются на приосевую часть Лосевской шовной зоны и Салтыковский, Кривоборский и Павловско-Мамонский линейные прогибы неоген-четвертичного структурно-вещественного комплекса (рис. 1, В). Другая часть аномалий явно тяготеет к наложенным зонам разломов плитной стадии, которые активизировались на неотектоническом этапе и выразились в новейшем структурно-вещественном комплексе прогибами на северном ограничении Калачского поднятия. Наконец, часть аномалий может быть сопоставлена с зонами повышенной литогенетической трещиноватости осадочного чехла.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Между параметрами сейсмического шума и латеральными неоднородностями новейшей структуры как на уровне неоген-четвертичного структурно-вещественного комплекса, осадочного чехла в целом, так и кристаллического фундамента существует устойчивая связь.

2. Предложенный метод исследования сейсмического шума может быть использован для картирования зон повышенной дезинтеграции пород и, в частности, зон разломов на территории ВКМ. При соответствующей доработке метода (подборе частот) возможно более точное определение пространственного положения зон дезинтеграции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев Н. И. Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР (вопросы региональной и теоретической неотектоники) / Н. И. Николаев. – М. : Госгеолтехиздат, 1962. – 392 с.
2. Лобковский Л. И. Современные проблемы геотектоники и геодинамики / Л. И. Лобковский, А. М. Никишин, В. Е. Хаин. – М. : Науч. мир, 2004. – 612 с.
3. Леонов Ю. Г. Платформенная тектоника в свете представлений о тектонической расслоенности зем-

ной коры / Ю. Г. Леонов // Геотектоника. – 1991. – № 6. – С. 3–20.

4. Добрецов Н. Л. Мантийные суперплюмы как причина главной геологической периодичности и глобальных перестроек / Н. Л. Добрецов // Докл. АН. – 1997. – Т. 357. – № 6. – С. 787–800.

5. Макаров В. И. Новейшая тектоническая структура Центрального Тянь-Шаня / В. И. Макаров. – М. : Наука, 1977. – 171 с.

6. Белоусов Т. П. Делимость земной коры и палеонапряжения в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах Земли / Т. П. Белоусов, С. Ф. Куртасов, Ш. А. Мухамедиев. – М. : ОИФЗ РАН, 1997. – 324 с.

7. Раскатов Г. И. Прогнозирование тектонических структур фундамента и чехла древних платформ и форм погребенного рельефа средствами геолого-геоморфологического анализа : (на примере Воронежской антеклизы) / Г. И. Раскатов. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1972. – 108 с.

8. Раскатов Г. И. Геоморфология и неотектоника территории Воронежской антеклизы / Г. И. Раскатов. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1969. – 164 с.

9. Никольский Ю. И. Карта аномального гравитационного поля России и прилегающих акваторий / Ю. А. Никольский // Геологический атлас России. Раздел 2. Геологическое строение и геофизическая характеристика недр. – М. ; СПб., 1996. – С. 35–51.

10. Трегуб А. И. Неотектоника территории Воронежского кристаллического массива / А. И. Трегуб // Тр. НИИ геологии ВГУ. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 2002. – Вып. 9. – 220 с.

11. Шерман С. И. Области динамического влияния разломов : (результаты моделирования) / С. И. Шерман, С. А. Борняков, В. Ю. Буддо. – Новосибирск : Наука, 1983. – 112 с.

12. Ненахов В. М. Минерагенические исследования территорий с двухъярусным строением : (на примере Воронежского кристаллического массива) / В. М. Ненахов, Ю. Н. Стрик, А. И. Трегуб, В. М. Холин, М. И. Шабалин – М. : ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2007. – 284 с.

13. Сафронич И. Н. Некоторые особенности микросейсмического процесса в пределах региональных структурно-тектонических элементов Воронежского кристаллического массива / И. Н. Сафронич, Л. И. Надежка // ДАН. – 2008. – Т. 418. – № 5. – С. 689–692.

14. Хаврошкин О. Б. Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии / О. Б. Хаврошкин – М. : ОИФЗ РАН, 1999. – 286 с.

Трегуб Александр Иванович – профессор, Воронежский государственный университет. Тел.: (4732) 208-628

Орлов Радомир Аполлонович – старший научный сотрудник, лаборатория сейсмического мониторинга Воронежского кристаллического массива Геофизической службы Российской Академии наук. Тел.: (4732) 208-628

Tregub Aleksandr Ivanovich Voronezh – Professor, Voronezh State University. Tel.: (4732) 208-628

Orlov Radomir Apollonovich – Research Worker, Laboratory of Seismic Monitoring Voronezh Crystalline Massif Geophisic Service of Russian Academy Sciens. Tel.: (4732) 208-628