

О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

Л. И. Надежка, С. П. Пивоваров*, М. А. Ефременко*, А. Е. Семенов

Воронежский государственный университет

*Геофизическая служба РАН, Обнинск

Поступила в редакцию 1 марта 2010 г.

Аннотация. Зарегистрированы местные землетрясения на территории Воронежского кристаллического массива сетью сейсмических станций. Самое сильное землетрясение – «Никольское» ($M = 3,8$). Наблюдается не равномерное временное распределение местных землетрясений и выделившейся сейсмической энергии. Отмечаются периодичности в распределении сейсмической энергии.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, сейсмичность, землетрясения, энергетический класс.

Abstract. Local scale earthquakes are registered by the seismic network within the VCM boundaries. The most powerful is «Nikolskoye» earthquake with $M = 3,8$. These earthquakes and the energy released by them are distributed irregularly in time. Periodicities can be observed in distribution of the seismic energy.

Key words: seismic monitoring, seismicity, earthquakes, power class

Введение

Землетрясения являются наиболее ярким выражением активных тектонических процессов. До последнего времени считалось, что платформенные территории тектонически и сейсмически пассивны. Однако за последние двести лет на древних платформах произошли крупные землетрясения. Только в XX в. инструментально зафиксированы сильнейшие землетрясения на Южно-Китайской, Северо-Американской, Австралийской платформах [1]. На Восточно-Европейской платформе (ВЕП) за последние двести лет произошло более ста сильных землетрясений, почти четверть из которых – на территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и его приграничных областях [2, 3].

За последние десять лет на территории ВЕП инструментально зафиксировано более десяти ощутимых (5–6 баллов по шкале МСК-64) землетрясений, одно из которых произошло на территории ВКМ [4–6].

Землетрясения, как правило, возникают внезапно. Они являются неизбежным следствием продолжающейся глобальной эволюции литосферы нашей планеты. В настоящее время все еще не разработана теория прогноза землетрясений. Они часто происходят там, где не прогнозировались, или же такой силы, которую не предполагали. Это-

му есть многочисленные примеры: Спитакское землетрясение (1988), Газлийские (1976, 1984), Суматринское (2004) и т. д. Сложность проблемы прогноза обусловлена целым рядом причин, одной из которых является недостаточное знание строения и состояния земной коры и более глубоких горизонтов Земли.

Неоднородности строения земной коры являются источниками локальной системы напряжений. Взаимодействия локальной системы напряжений с региональными и надрегиональными системами создают сложную картину современного напряженно-деформированного состояния различных горизонтов земной коры. Напряжения, как правило, концентрируются в ослабленных зонах, где и происходит разрядка их путем землетрясений.

Воронежская сеть сейсмических наблюдений

На примере Воронежского кристаллического массива, наиболее хорошо изученного прямыми геологическими и геофизическими методами и наиболее сейсмически активной территории в пределах ВЕП дан анализ характера современной сейсмичности в условиях платформенной литосферы.

В настоящее время на территории ВКМ осуществляется сейсмический мониторинг сетью сейсмических станций, состоящей из семи цифровых и одной аналоговой станции (рис. 1).

Основные характеристики и координаты сейсмических станций приведены в работах [7–9].

© Надежка Л. И., Пивоваров С. П., Ефременко М. А., Семенов А. Е., 2010

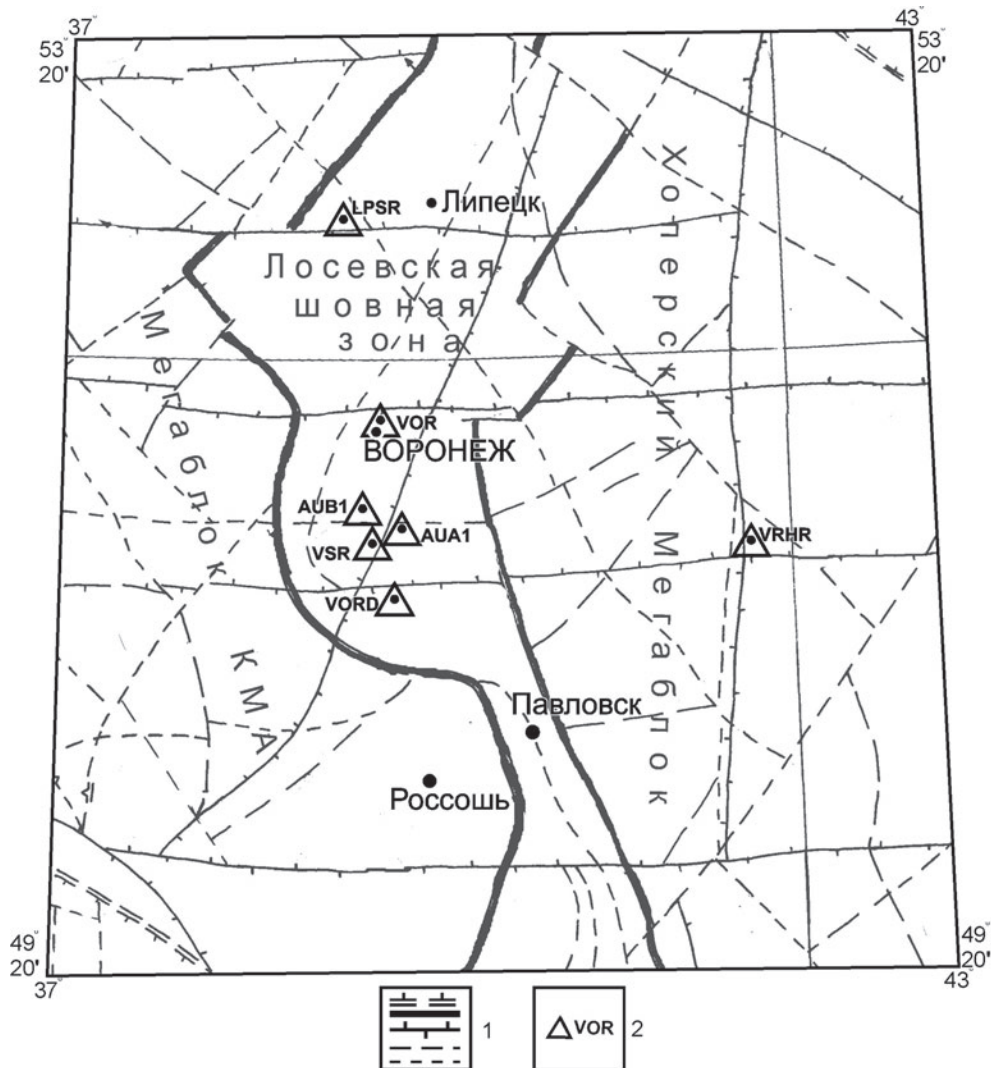


Рис. 1. Схема расположения сейсмических станций Воронежского региона: 1 – разломы различных рангов в кристаллическом фундаменте; 2 – сейсмические станции

Станции укомплектованы двумя типами сейсмометров СМЗ-КВ и СМЗ-ОС, входят в Федеральную сеть сейсмических наблюдений России и ведут наблюдения за сейсмическим режимом не только Воронежского региона, но и всего Земного шара.

Для обеспечения уверенной регистрации местных сейсмических событий и телсейсмических землетрясений в широком диапазоне магнитуд необходимо, чтобы в месте установки сейсмических станций был минимальный уровень сейсмического шума. С этой целью места установки сейсмических станций выбирались с учетом региональных особенностей геологического строения ВКМ, минимального уровня естественного микросейсмического шума и минимума помех, обусловленных промышленной и хозяйственной деятельностью человека. Сейсмоприемники устанавлива-

лись на бетонных основаниях, в отдельных случаях были подготовлены специальные постаменты. Каждая станция оборудована приемником GPS сигнала для синхронизации времени. Запись производится непрерывно на жесткий диск станции и копируется для передачи данных в центр обработки на ZIP-дискеты или флеш-карты. Данные со станций «Сторожевое» (VSR), «Новохоперск» (VRH) и «Галичья гора» (LPSR) поступают в режиме, близком к реальному времени.

На рис. 2 представлены амплитудно-частотные спектры сейсмического шума (МСШ) в местах установки сейсмических станций региональной сети. Они получены путем накопления 100 спектров пятиминутных интервалов волнового поля, случайно взятых в течение суток, и дают полную характеристику МСШ.

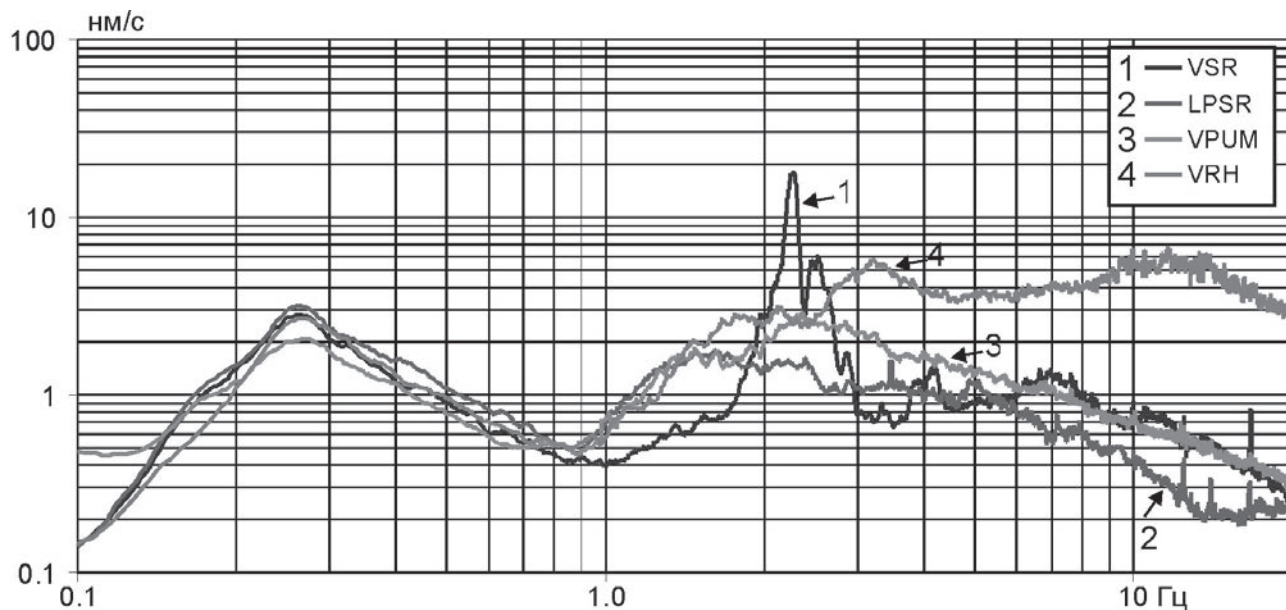


Рис. 2. Среднесуточные амплитудно-частотные спектры Z-составляющей микросейсмического шума в пунктах установки сейсмических станций региональной сети: VSR – «Сторожевое», LPSR – «Галичья гора», VPUM – «Манино», VRH – «Новохоперск»

Как видно из рис. 2, микросейсмический шум имеет низкие значения, во всем частотном диапазоне на всех станциях ниже 10 нм/с, а в диапазоне частот 0,7–1,4 Гц – ниже 2 нм/с. Локальный максимум на частоте 2,3 Гц по данным станции VSR связан с работой НВ АЭС.

Такой уровень микросейсмического шума позволяет уверенно фиксировать местные сейсмичес-

кие события даже низкого энергетического класса [7], а также в большом магнитудном диапазоне телесейсмические землетрясения.

На рис. 3 показаны возможности регистрации телесейсмических событий в сравнении с результатами регистрации Федеральной сетью.

Как видно из рис. 3, значительная часть телесейсмических землетрясений с магнитудой 5 и

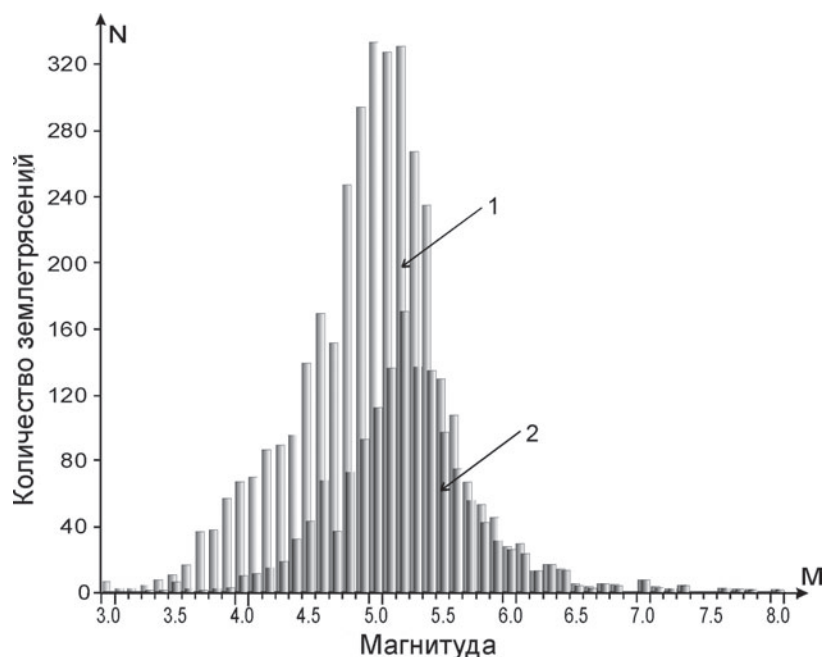


Рис. 3. Сравнение количества событий, зарегистрированных Федеральной сетью сейсмических наблюдений (1) и Воронежской сетью (2) за 2009 г., в зависимости от их магнитуды

ниже регистрируется Воронежской региональной сетью, а с магнитудой 6 и выше – Воронежской региональной сетью практически 100 %.

Местные землетрясения уверенно регистрируются сетью начиная с 6 энергетического класса. Одной или двумя станциями регистрируются сейсмические события более низкого энергетического класса.

Некоторые характеристики землетрясений, зарегистрированных инструментально

Сейсмический мониторинг, осуществляемый сетью сейсмических станций, позволил оценить фактическую сейсмическую ситуацию на территории Воронежского кристаллического массива. За

период с 1998–2009 гг. зарегистрировано около 300 местных землетрясений. На рис. 4 показано распределение землетрясений по энергетическому классу.

Как видно из рисунка, наиболее часто происходят землетрясения 7 энергетического класса – примерно 42 % всех местных землетрясений. Значительная часть землетрясений является событием 8 энергетического класса. Следует заметить, что оценки глубины очага позволяют сделать вывод, согласно которому местные землетрясения в подавляющем большинстве верхнекоровые. Почти 31 % землетрясений имеет глубину гипоцентра до 1 км. 25 % землетрясений имеет глубину очага около 5 км (рис. 4).

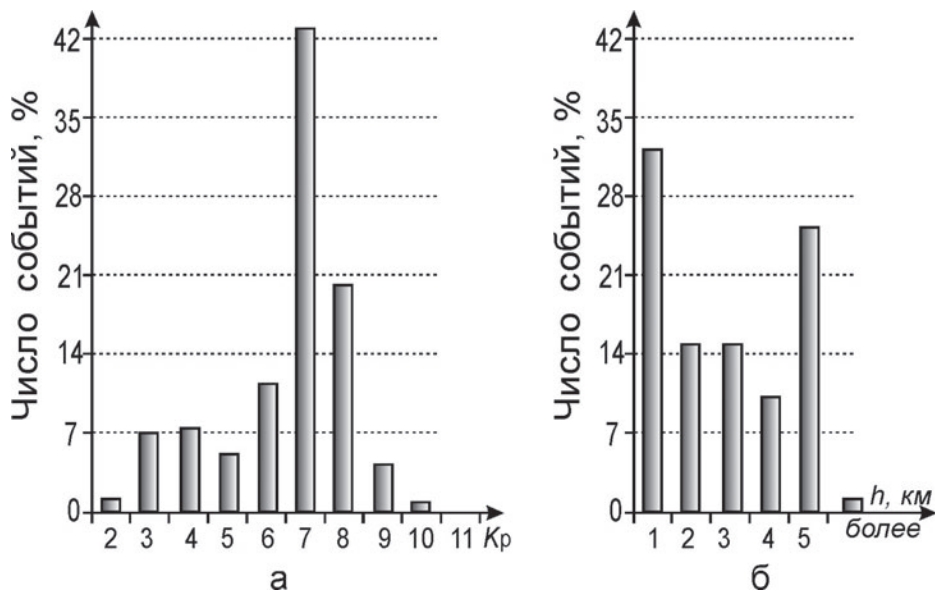


Рис. 4. Распределения количества местных землетрясений по классам (а) и глубине (б)

Волновые формы местного низкомагнитудного землетрясения представлены на рис. 5. Оно записано четырьмя полевыми сейсмическими станциями на расстояниях от 700 м до 5,2 км. Хорошо видно, что максимальные значения амплитуд отмечаются в диапазоне частот 6–7 Гц.

На рис. 6 показана классическая запись 3^x составляющих волновой формы землетрясения 9 энергетического класса, которое произошло 22 ноября 2009 г. на расстоянии примерно 200 км от Воронежа. Отмечается максимальный уровень амплитуд в диапазоне частот 3–10 Гц. В целом, можно отметить, что в волновых формах записей местных землетрясений, происходящих в литосфере ВКМ, наиболее представлены относительно высокочастотные составляющие в диапазоне частот 3–10 Гц.

Наряду с низкомагнитудными землетрясениями на территории ВКМ случаются и относительно сильные землетрясения. Так, 31 марта 2000 г. произошло Никольское землетрясение. Оно было зарегистрировано 10 станциями, расположенными на Скандинавском полуострове, 6 станциями Геофизической службы РАН, 2 станциями национальной сети Польши. Работающие в то время три станции Воронежской сети также зарегистрировали это землетрясение. На рис. 7 показаны волновые формы землетрясения и результаты макросейсмического обследования.

Никольское землетрясение с $M = 3,8$ произошло в краевой части Калач-Эртильского блока, на расстоянии примерно 20 км от г. Калача. Эпицентр его приурочен к зоне действия активного Новохопер-

Схема расположения пунктов регистрации локального события 12/08/2006 22:49:48 (класс 2.0)

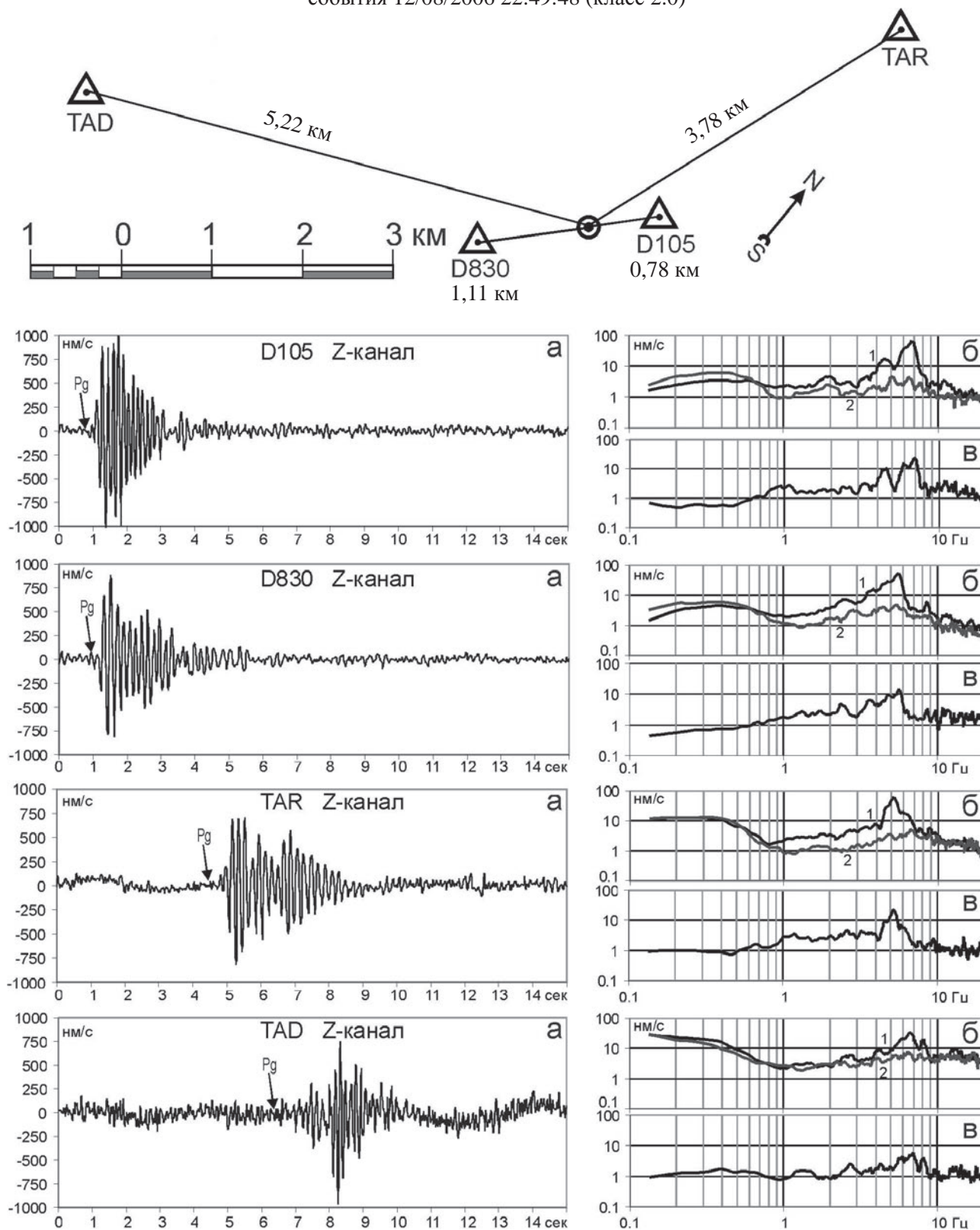


Рис. 5. Пример записей вертикальных составляющих (а) локального события на разных удалениях, спектрального состава его записи (б, 1) и фона (б, 2), а также отношения (1) к (2) (в)

22/11/2009 20:43:07 Купянск (49.93° N, 37.61° E, h = 30 км) $K_p = 9,2$ $\Delta = 187$ км VSR

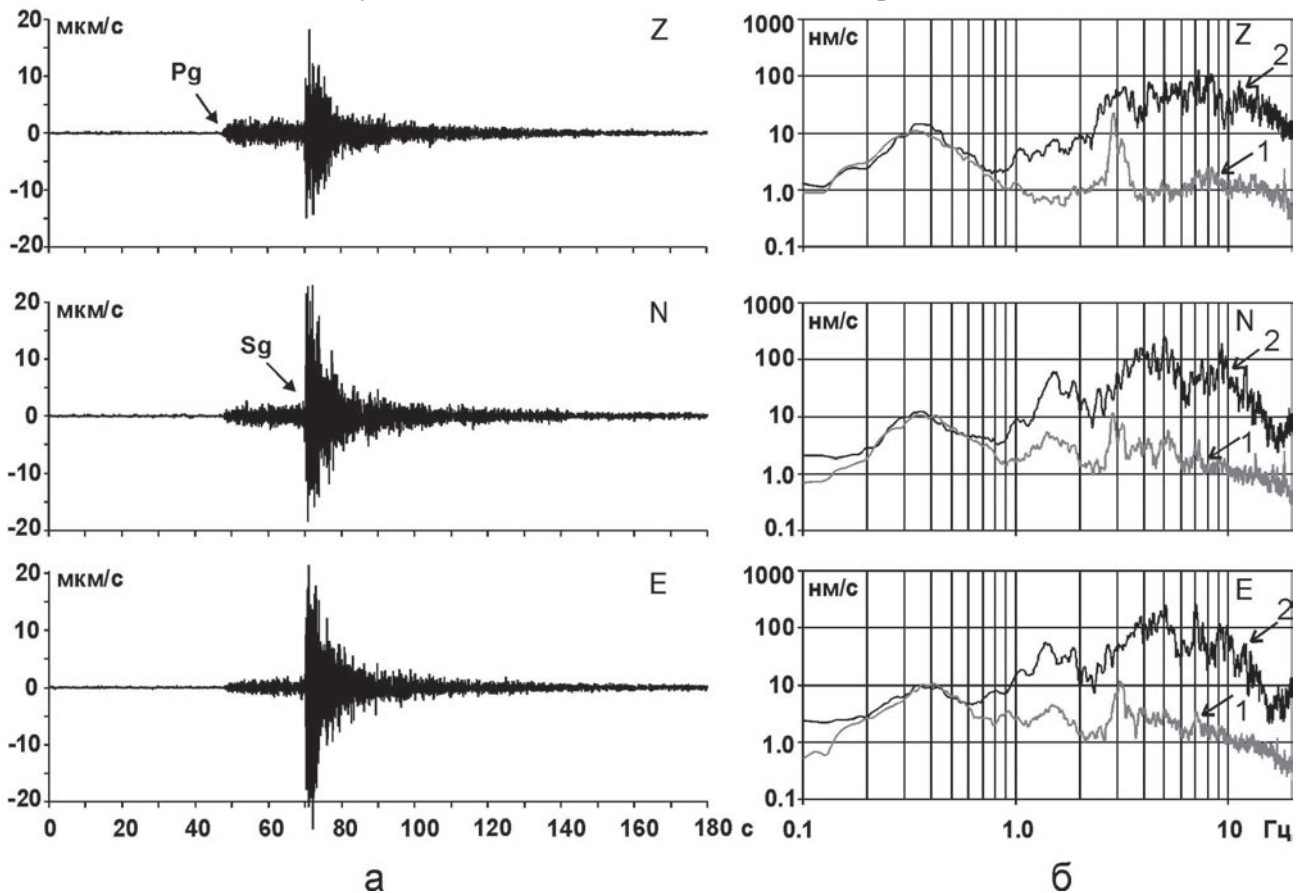


Рис. 6. Волновые формы (а), амплитудно-частотные спектры (б, 1) и фон (б, 2) землетрясения 9 энергетического класса

ского разлома [5, 10]. Макросейсмические данные по этому землетрясению получены с использованием стандартных листов опроса. Опрос проведен в девяти населенных пунктах, где постройки, как правило, одноэтажные, деревянные, обложенные кирпичом. Всего опрошено было около ста человек. Результаты опроса позволили согласовать координаты эпицентра землетрясения, определенные по инструментальным данным, и построить изосейсты.

Отметим, что такое землетрясение – довольно редкое явление на платформе. В основном, как выше отмечалось, это землетрясение 6–9 энергетических классов.

Различная история геологического развития крупных структурных единиц ВКМ предопределила различие не только глубинного строения, но и современного сейсмического режима Курского, Хоперского мегаблоков и разделяющей их Лосевской шовной зоны. Наибольшее количество землетрясений происходит в Лосевской шовной зоне. Однако, как правило, они невысокого энергетического класса, очаг подавляющего

большинства их расположен в самой верхней части кристаллической коры (до 2 км). Более сильные землетрясения происходят на глубинах порядка 5 км. Наиболее сильные землетрясения с более глубоким положением очага происходят в Хоперском мегаблоке. Землетрясения с глубиной меньше 4 км имеют энергетический класс меньше 7. Курский мегаблок занимает промежуточное положение. Здесь происходит значительное количество относительно равномерных, без существенных скачков землетрясений, но они в основном невысокого энергетического класса, с глубиной очага до 3 км. Однако в этом мегаблоке происходят и значимые землетрясения (9–10 энергетического класса) с глубиной очага 5 и более километров.

Различный энергетический класс землетрясений, глубина очага – все это является свидетельством продолжающейся эволюции региона со специфическими чертами ее крупных структур. Наиболее активные современные сеймотектонические процессы наблюдаются в Хоперском мегаблоке.

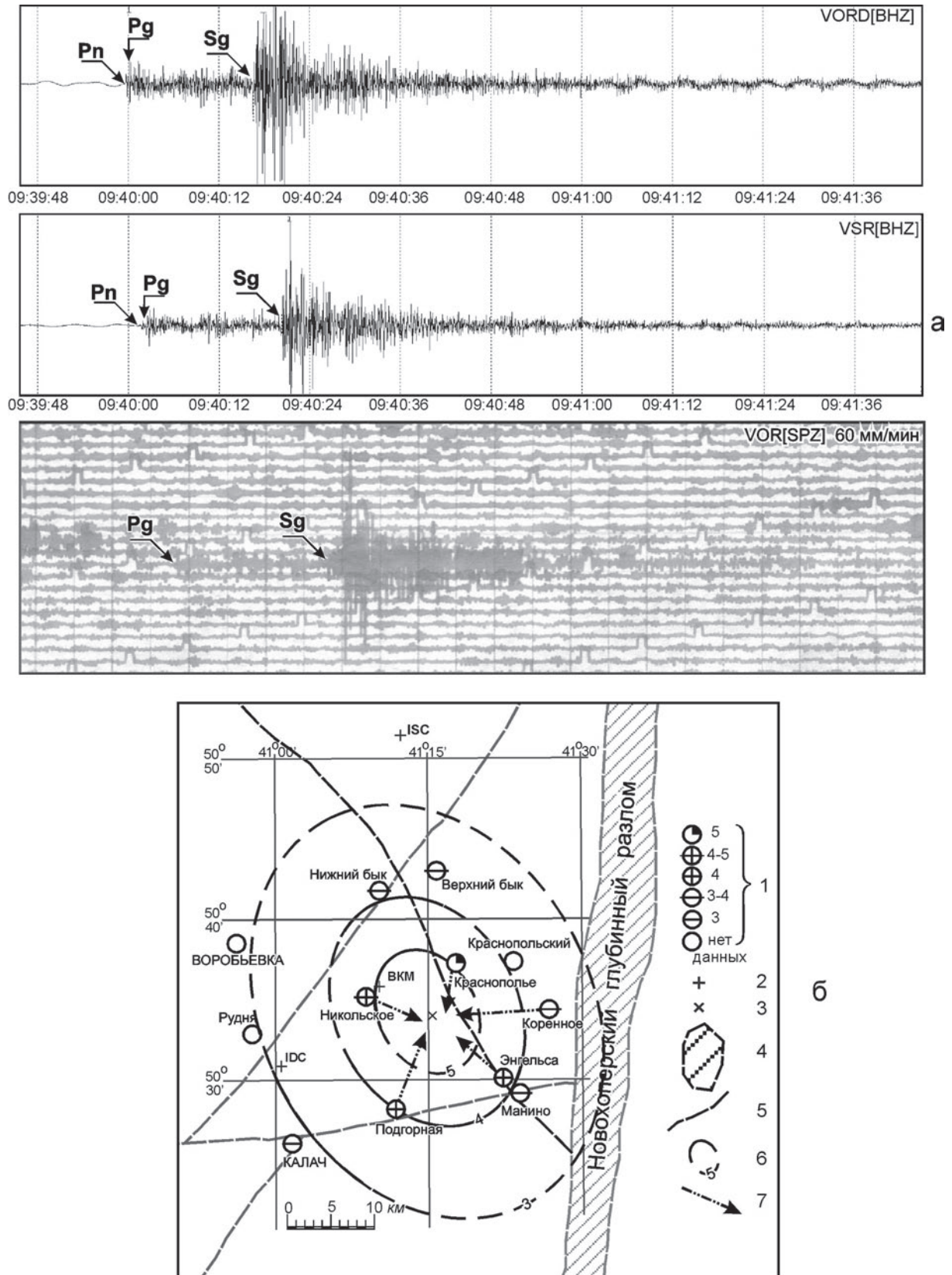


Рис. 7. Никольское землетрясение 31 марта 2000 г.: а – волновые формы Z-компоненты записи; б – эпицентральная зона: 1 – интенсивность сотрясений в баллах; 2 – эпицентр по инструментальным данным; 3 – макросейсмический эпицентр; 4 – глубинный разлом первого порядка; 5 – тектонические нарушения более высокого порядка; 6 – изосейсты; 7 – азимуты на эпицентр (по описаниям очевидцев)

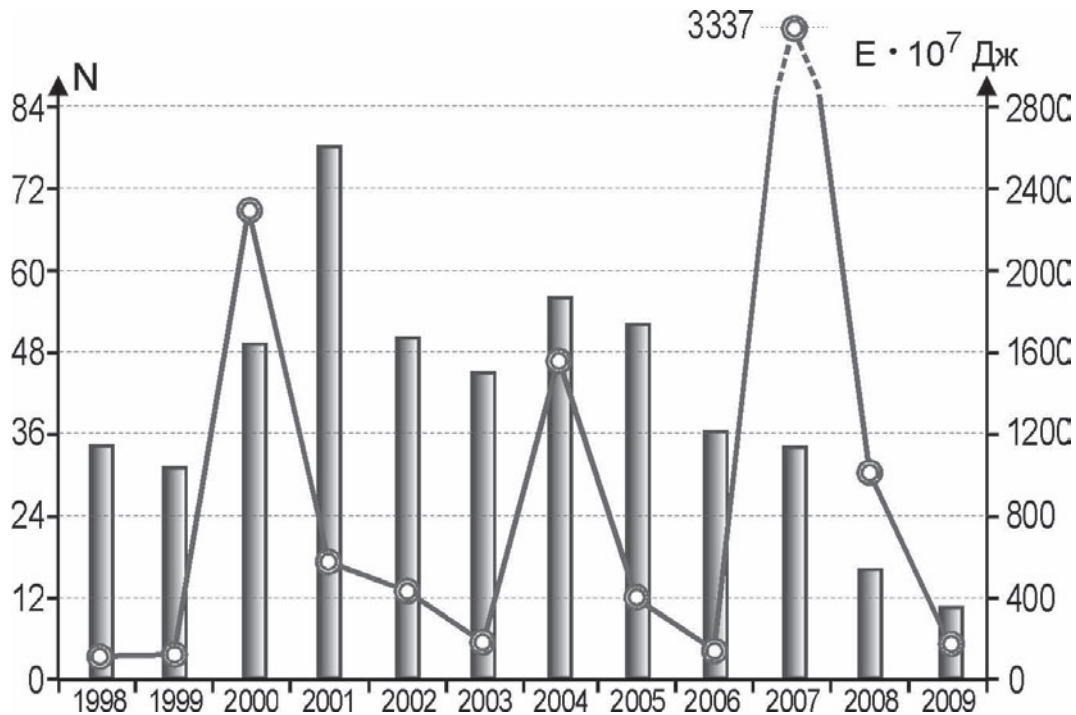


Рис. 8. Распределения количества землетрясений и энергии по годам для ВКМ и ближайшей территории

Временное распределение землетрясений

Анализ временного распределения количества землетрясений и выделившейся при этом энергии показал, что оно неравномерно (рис. 8). Наибольшее количество землетрясений произошло в 2001 и 2004 гг. Однако количество выделившейся сейсмической энергии распределено несколько иначе. Наиболее значимые величины выделившейся сейсмической энергии наблюдались в 2000, 2004 и в 2007 гг. Годы 2001–2003, 2005–2006 и 2008–2009 характеризуются минимумом выделившейся сейсмической энергии, т. е. наблюдается ритмичность во временном распределении сейсмической энергии для территории ВКМ. Периоды ритмов составляют порядка 2–3 года. Заметим, исследование временного распределения исторических землетрясений показало, что как для Восточно-Европейской платформы, так и для ВКМ характерна ритмичность в проявлении сейсмической активности. 20–30-летний интервал относительно повышенной сейсмической активности сменяется 50–60 годами относительного спада ее [11–14]. Это указывает на волновой, нелинейный характер проявления сейсмичности, обусловленной, по-видимому, действием деформационных волн, порождаемых, возможно, надрегиональной системой напряжений. Некоторые исследователи также обнаруживают ритмичности в возникновении очагов землетрясений. Периоды ритмов – 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0 и 14 лет

[11]. Причем такая ритмичность характерна как для горно-складчатых областей (Тянь-Шань), так и для платформенного района (Фенноскандия) [11–14].

Ритмичности во временном ходе сейсмичности, отмеченные в разных геолого-геодинамических условиях, могут свидетельствовать о глобальной природе волнового поля напряжений. Волновые напряжения распространяются от границ литосферных плит – зон спрединга и зон субдукции. Причиной, порождающей напряжения в этих зонах, по-видимому, являются процессы, происходящие в глубоких недрах Земли.

Взаимодействие глобальной (надрегиональной) системы напряжений с региональной и локальной может быть причиной ритмов различной продолжительности, которые, накладываясь друг на друга, образуют сложную картину современной сейсмической активности.

Выводы

Сейсмический мониторинг Воронежского кристаллического массива показал, что платформенная литосфера не является сейсмически пассивной. И хотя регистрируемые землетрясения в основном низкомagnitude и верхнекоровые, они отражают современную жизнь земной коры и, возможно, верхов мантии. Особого внимания заслуживает инструментально зафиксированное 5-балльное

(шкала МСК-64) «Никольское» землетрясение, которое, наряду с историческими, отражает значительную сейсмическую активность территории ВКМ.

Инструментально установленная фактическая сейсмическая активность территории Воронежского кристаллического массива требует пристального внимания и учета при строительстве и эксплуатации объектов самого разного назначения, т. к. даже несильные, но верхнекоровые землетрясения могут вызывать на поверхности Земли значительные перемещения. Последние могут служить причиной аварий и даже катастроф.

Временное распределение землетрясений и выделившейся при этом сейсмической энергии не

является равномерным. Четко устанавливаются ритмичности с периодом 2 года. Более низкочастотные ритмы характерны и для распределения исторических землетрясений как на территории Восточно-Европейской платформы, так и на территории ВКМ. Это, по-видимому, является отражением нелинейного характера сеймотектонических процессов в континентальной литосфере.

Отмечаемая рядом исследователей ритмичность сейсмической активности в различных геолого-геодинамических условиях [11–14] указывает на глобальный характер этого явления.

Исследования выполнены при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки РФ проект 2.1.1/4637

ЛИТЕРАТУРА

1. Современная динамика литосферы континентов: Платформы / под ред. Н. А. Логачева, В. С. Хромовских. – М. : Недра, 1991. – С. 320.
2. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. – М. : Наука, 1977. – С. 536.
3. Никонов А. А. Каталог тектонических землетрясений Центральной части Восточно-Европейской платформы / А. А. Никонов // Геодинамика и геоэкология. – 1999. – С. 271–273.
4. Надежка Л. И. Землетрясение 31 марта 2000 г. в восточной части Воронежского кристаллического массива по данным группы сейсмостанций «Воронеж» / Л. И. Надежка, И. Н. Сафронич, И. П. Габсатарова // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов : матер. Междун. конф. – Воронеж, 2001. – С. 146–149.
5. Надежка Л. И. Никольское землетрясение / Л. И. Надежка [и др.] // Землетрясения Северной Евразии в 2000 г. – 2006. – С. 245–253.
6. Габсатарова И. П. Современные возможности определения параметров землетрясений по инструментальным данным в районах слабой сейсмичности на примере Новодарьевского землетрясения 11 мая 2004 года с $M_s = 3,8$ (Луганская обл., Украина) / И. П. Габсатарова, Е. А. Бабкова // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения : материалы XII Междун. конф. – Воронеж, 2006. – Т. 1. – С. 122–127.
7. Надежка Л. И. Южная часть Русской плиты / Л. И. Надежка [и др.] // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / под ред. Н. В. Шарова, А. А. Маловичко, Ю. К. Щукина. – Петрозаводск, 2007. – С. 289–305.
8. Надежка Л. И. Воронежский кристаллический массив / Л. И. Надежка [и др.] // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. – 2005. – С. 190–194.
9. Надежка Л. И. Сейсмическая станция «Галичья гора» / Л. И. Надежка [и др.] // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : матер. Третьей междун. сейсмологической школы. – Кисловодск, 2008. – С. 100–105.
10. Надежка Л. И. Воронежский кристаллический массив / Л. И. Надежка [и др.] // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. – 2006. – С. 193–196.
11. Юдахин Ю. Н. О волновых процессах в литосфере земли / Ю. Н. Юдахин // Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов : матер. Всероссийской конф. – Архангельск, 2004. – С. 407–409.
12. Юдахин Ю. Н. Особенности проявления геодинамических процессов и внутриплитной сейсмичности на северо-западе Восточно-Европейской платформы / Ф. Н. Юдахин, В. И. Французова // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов : матер. Междун. конф. – Воронеж, 2001. – С. 223–225.
13. Французова В. И. Сопоставление ритмов платформенной и орогенной сейсмичности / В. И. Французова, Ф. Н. Юдахин // Матер. Междун. конф. – М. : ВНИИгеофизика, 2003. – С. 249–253 (CD-ROM).
14. Курские А. К. Ритмы и энергетика современных геодинамических и сейсмических процессов / А. К. Курские, Т. Д. Абаканов. – Алматы : Эверо, 2007. – С. 64.

Рецензент Н. М. Чернышов

Воронежский государственный университет

Л. И. Надежка, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией глубинного строения, геодинамики и сейсмического мониторинга им. профессора А. П. Таркова

Тел. 8 (4732) 557-828

nadezhka@geophys.vsu.ru

Voronezh State University

L. I. Nadezhka, Candidate of Geology-Mineralogical Sciences, Head of a Tarkov Laboratory of deep structure, geodynamic and seismic monitoring

Tel. 8 (4732) 557-828

nadezhka@geophys.vsu.ru

Геофизическая служба РАН, Обнинск

С. П. Пивоваров, младший научный сотрудник лаборатории Сейсмического мониторинга Воронежского кристаллического массива Геофизической службы Российской академии наук

Тел. 8 (4732) 557-844

serg@geophys.vsu.ru

Geophysic Service of Russian Academy Sciences

S. P. Pivovarov, Research Worker, Laboratory of Seismic Monitoring Voronezh Cristalline Massiff Geophysic Service of Russian Academy Sciences

Tel. 8 (4732) 557-844

serg@geophys.vsu.ru

М. А. Ефременко, младший научный сотрудник лаборатории Сейсмического мониторинга Воронежского кристаллического массива Геофизической службы Российской академии наук

Тел. 8 (4732) 557-844

nadezhka@geophys.vsu.ru

M. A. Efremenko, Research Worker, Laboratory of Seismic Monitoring Voronezh Cristalline Massiff Geophysic Service of Russian Academy Sciences

Tel. 8 (4732) 557-844

nadezhka@geophys.vsu.ru

Воронежский государственный университет

А. Е. Семенов, научный сотрудник лаборатории глубинного строения, геодинамики и сейсмического мониторинга им. профессора А. П. Таркова

Тел. 8 (4732) 557-828

nadezhka@geophys.vsu.ru

Voronezh State University

A. E. Semenov, Research Worker of a Tarkov Laboratory of deep structure, geodynamic and seismic monitoring

Тел. 8 (4732) 557-828

nadezhka@geophys.vsu.ru