

ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА, УРАЛ и ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ:

УДК 550.348.346

НЕКОТОРЫЕ ЧЕРТЫ СТРОЕНИЯ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА И ПЕРВЫЕ

РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ЕГО ТЕРРИТОРИИ

О.Е. Старовойт, Л.И. Надежка, А.И. Дубянский, И.Н. Сафронич,

С.П. Пивоваров, А.В. Савенков

В 1996 г. на основе четырехстороннего соглашения между Геофизической службой РАН, Объединенным институтом физики Земли РАН, Воронежским государственным университетом и администрацией Воронежской области в г. Воронеже была установлена первая аналоговая сейсмическая станция "Воронеж" для изучения фактической сейсмической активности Воронежского кристаллического массива (ВКМ).

Краткая геолого-геофизическая характеристика ВКМ. Воронежский кристаллический массив – одна из крупнейших структур Восточно-Европейской платформы (ВЕП) – представляет собой погребенный выступ (горст) пород архейского и протерозойского возраста, образующих кристаллический фундамент одноименной антеклизы (рис. 1). Она занимает центральную часть древней Восточно-Европейской платформы и ограничена внутриплатформенными авлакогенами (Днепровско-Донецким на западе и юго-западе, Пачелмским на северо-востоке, Московским на севере) и региональными уступами (сбросами) в рельефе кристаллического фундамента (на границе с Прикаспийской синеклизой) (рис. 1). С поверхности массив покрыт платформенным чехлом в основном терригенного состава, мощность которого минимальна в сводной части антеклизы и возрастает до 800 м и более на ее крыльях. Большая часть ВКМ характеризуется равнинным рельефом с перепадом высот от 150 до 250 м и только в долинах рек абсолютные отметки рельефа дневной поверхности понижаются до 60-70 м.

Породы осадочной толщи залегают на эродированной поверхности кристаллического фундамента с резким угловым несогласием. Основание разреза представлено палеозойским комплексом, включающим девонские и каменноугольные отложения. В разрезе девона преобладают терригенные отложения с подчиненными прослоями мергелей, доломитов, известняков. На южном и юго-западном склонах антеклизы разрез платформенного чехла начинается отложениями каменноугольного возраста, которые в основном сложены карбонатными и песчано-глинистыми породами. Их мощность в пределах антеклизы не превышает 150-200 м [1-4].

Мезозойский комплекс на исследуемой территории представлен юрскими и меловыми отложениями, которые в центральной части Воронежской антеклизы залегают непосредственно на породах докембрия. Кайнозойские отложения распространены повсеместно и представлены песками, суглинками и моренными образованиями. В неотектоническом плане району исследований соответствуют две крупные структуры: южная часть Окско-Донской впадины и Средне-Русской антеклизы.

Кристаллический фундамент представлен породами архея и нижнего протерозоя [4-14]. В соответствии с современными геолого-геофизическими данными ВКМ включает гетерогенные и в разной мере эродированные крупные структуры: Могилевский, Брянский, Курский, Хоперский и Волгоградский мегаблоки и Лосевскую шовную зону.

Хоперский и Волгоградский мегаблоки сложены отложениями воронцовской серии нижнего протерозоя, представленными ритмично переслаивающимися сланцами, в том числе углеродсодержащими, метапесчаниками, метаалевролитами, изредка метаэффузивами. На участках глубокого метаморфизма породы серии превращены в гнейсы графитовые, биотит-плагиоклазовые. Они вмещают многочисленные интрузии базит-гипербазитовых тел мамоновского комплекса и гранитоидов бобровского комплекса.

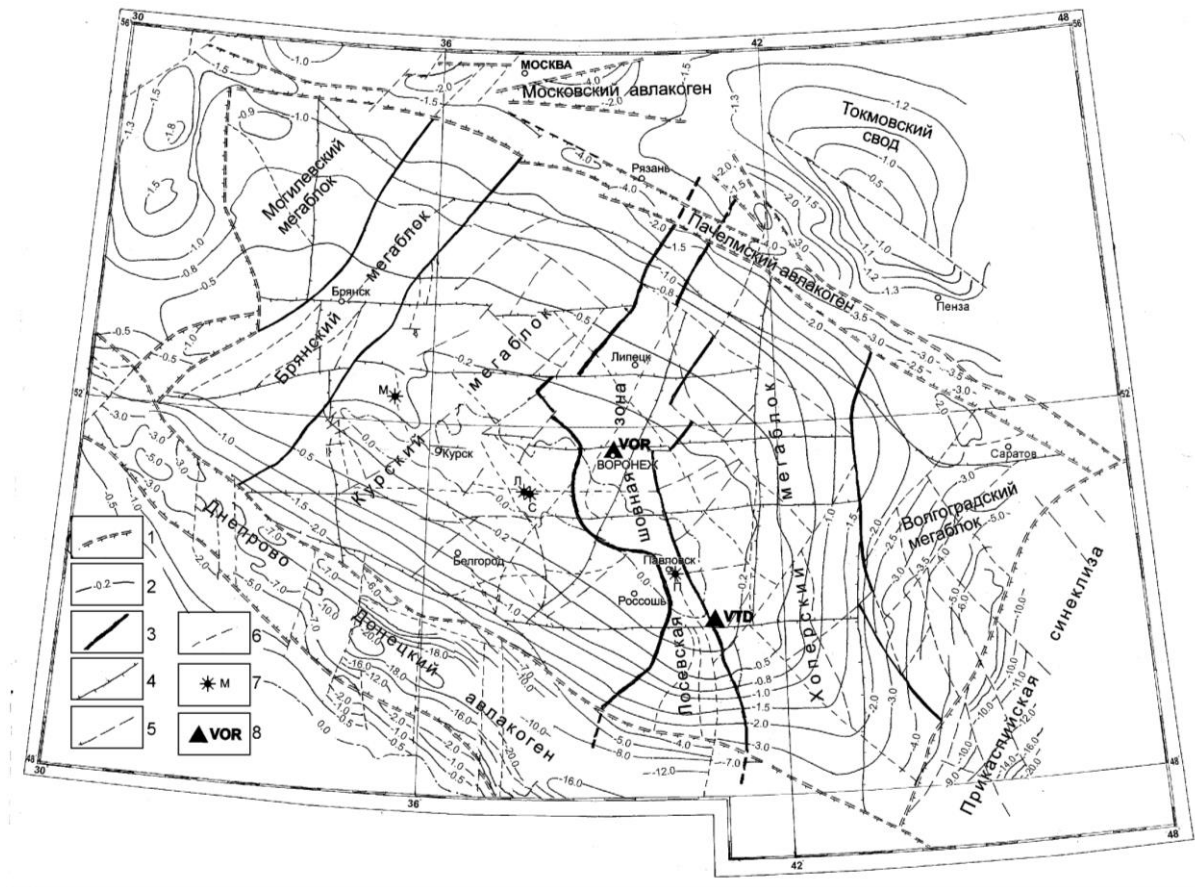


Рис. 1. Схема рельефа фундамента и тектонических нарушений ВКМ

1 – условные границы крупных структур Восточно-Европейской платформы; 2 – изогипсы фундамента; 3 – границы основных структур Воронежского кристаллического массива.

Тектонические нарушения: 4 – первого порядка; 5 – второго порядка; 6 – третьего порядка; 7 – карьеры: М – Михайловский, П – Павловский, Л – Лебединский, С – Стойлинский; 8 – сейсмические станции: VOR – "Воронеж", VTD – "Тихий Дон".

Могилевский, Брянский и Курский мегаблоки включают ряд макроблоков 2-го ранга, структурно-вещественные комплексы которых представлены парагенезисом архейских зеленокаменных поясов и гранито-гнейсовых куполов (михайловская серия верхнего архея и обоянский комплекс нижнего архея) и характеризуются широким развитием раннекарельских рифтогенных структур (Михайловская, Орловско-Оскольская и др.), наследующими структурный план позднеархейских зеленокаменных поясов.

Крупномасштабная структура 1-го ранга – Лосевская шовная зона (ЛШЗ) характеризуется специфическим набором осадочно-метаморфических и вулканогенно-интрузивных формаций. В северо-восточной части зоны – это породы лосевской серии верхнего архея–нижнего протерозоя (метадациты, метабазальты, амфиболиты, ортосланцы основного состава), прорванные биотитовыми гранитами усманского комплекса и массивами роговообманковых габбро рождественского комплекса, а в западной части ЛШЗ – автохтонные метасоматические гранитоиды павловского комплекса, разделенные сильно мигматизированными (до темных мигматитов) породами архейского субстрата.

Кристаллический фундамент осложнен многочисленными тектоническими нарушениями различного ранга. Зоны разломов имеют сложное внутреннее строение, отчетливо выражаются в гравитационном и магнитном полях и, по всей видимости, могут рассматриваться, как глубинные разломы, которые разграничивают структуры с различной историей геологического развития [6,8]. Изучение этих зон свидетельствует о неоднократном обновлении тектонических разломов на различных стадиях развития ВКМ.

Кристаллическая кора, мощность которой составляет 45 ± 5 км, и верхняя мантия региона обнаруживают латеральную гетерогенность и вертикальную расслоенность. Выделяются блоки различного иерархического уровня: от мантийных с размерами порядка 300 км до верхнекоровых

с размерами 20-30 км, различающихся внутренней структурой и физическими особенностями. В целом для консолидированной части земной коры ВКМ характерна скоростная и плотностная модель, состоящая из трех относительно выдержанных в пространстве слоев (рис. 2). Самый верхний из них имеет мощность порядка 20 ± 4 км. В свою очередь, рассматриваемая часть земной коры разделяется на два слоя, разделенных границей на глубине 10 км, выше которой отмечается изменение скорости Р-волн (v_p) с глубиной с градиентом 0.036 с^{-1} . Скорости здесь изменяются в среднем от 5.95 до 6.3 км/с, плотность ρ составляет $2.65 \pm 0.08 \text{ г/см}^3$. Между границами на глубине 10 и 20 км распределение плотности имеет двумодальный характер, что свидетельствует о наличии двух моделей изменения плотности, существенно отличающихся друг от друга. Судя по значениям v_p и ρ , верхняя часть коры сложена породами гранито-гнейсового ряда. В интервале глубин 20-31.5 км пластовые скорости Р-волн возрастают до $6.7 \pm 0.2 \text{ км/с}$. По своим плотностным характеристикам это наиболее стабильная часть земной коры. Здесь ρ составляет $2.86 \pm 0.06 \text{ г/см}^3$. Увеличение v_p и ρ по сравнению с таковыми в вышележащем слое свидетельствует об увеличении основности слагающих его пород до уровня диоритов. С подошвой этого слоя связана регионально выдержанная сейсмическая граница Конрада. В нижней части коры между границей Конрада и Мохоровичича заключен слой мощностью ≈ 12 км. Скорость v_p и плотность ρ пород типичны для метабазитового ряда ($v_p = 7.0 \pm 0.4 \text{ км/с}$, $\rho = 2.90\text{-}3.10 \text{ г/см}^3$).

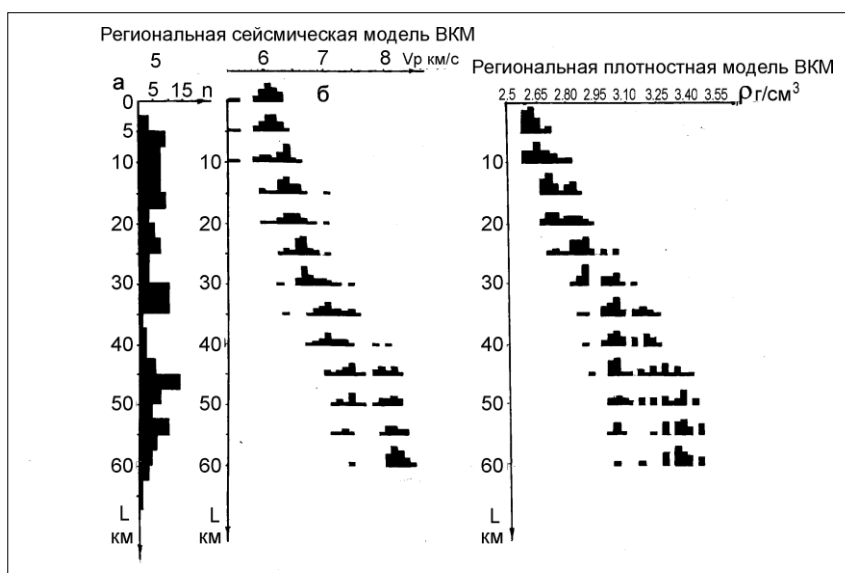


Рис. 2. Обобщенная геофизическая модель кристаллической коры ВКМ

а - распределение устойчивых отражающих границ в разрезе земной коры;
б, в - скоростная и плотностная модель земной коры ВКМ, соответственно.

Следует отметить, что в плотностном отношении эта часть земной коры наиболее сильно дифференцирована. Отмечается двумодальное распределение плотности, что свидетельствует о двух типах плотностных моделей. Еще ниже значения v_p и ρ резко разделены на две совокупности со средними значениями $v_p = 7.4$ и 8.1 км/с и $\rho = 3.10$ и 3.32 г/см^3 , при этом дисперсия плотности более существенна. Максимальные значения v_p и ρ указывают на присутствие в разрезе ультраосновных пород верхней мантии. Минимальные значения скорости и плотности, которые отмечаются до глубин порядка $51.5 \pm 2.5 \text{ км}$ свидетельствуют о наличии под границей Мохоро переходного слоя кора-мантия.

Неоднородность состава, физических свойств и структурных особенностей различных сегментов литосферы ВКМ создает условия для возникновения напряжений, разрядка которых может приводить к значительным тектоническим подвижкам.

Инструментальные наблюдения на ВКМ. Воронежский кристаллический массив характеризуется относительно невысокой сейсмичностью [15,16], однако по косвенным оценкам, выполненным разными авторами [16-20], его сейсмический потенциал достаточно высок, наиболее высокое значение которого ($M_{\max} = 5.0\text{-}5.4$) отмечается в восточной его части. На новой карте сейсмического районирования ОСР-97-С восточная часть ВКМ также выделяется повышенной сейсмичностью [21].

Особый интерес к сейсмичности ВКМ как типично платформенной структуры, связан не только с разработкой фундаментальных проблем, но и определяется возникшими в последнее время задачами экологии. В пределах его территории с высокой заселенностью развита мощная инфраструктура, сосредоточены объекты повышенного экологического риска (две АЭС – Курская и Нововоронежская, продуктопроводы, Россошанский химкомбинат, объекты спецназначения и т.п.). Функционируют четыре крупных карьера (рис. 1), где регулярно проводятся химические взрывы значительной мощности (до 100 тонн в.в. и выше). Имеется Воронежское водохранилище, существенно влияющее на характер локальных напряжений. Все эти факторы повышают сейсмический риск, особенно в настоящее время, когда продлен срок эксплуатации экологически ответственных объектов без должного переоснащения. В этой связи настоятельную необходимость приобретает оценка фактической сейсмической активности территории на основе инструментальных наблюдений.

Первые инструментальные данные о сейсмических событиях на территории ВКМ были получены в результате наблюдений, проведенных ведомственной сейсмической станцией "Тихий Дон" ($\varphi=50.09^{\circ}\text{N}$, $\lambda=40.51^{\circ}\text{E}$, $h_y=90$ м), работавшей на юге Воронежской области с июля 1983 г. по апрель 1990 г. Приборы были установлены на коренных породах (выходы гранитов на правом берегу р. Дон возле с. Тихий Дон Богучарского района). Для регистрации использовались широкополосный канал (типа СКМ-3) и узкополосный с центральной частотой около 1 Гц. Результаты обработки данных этой станции любезно предоставлены Ю.Ф. Копничевым за период с июля 1986 г. по июль 1987 г., за который на ней было зарегистрировано 2390 событий различной природы (местные землетрясения, карьерные взрывы и другие сигналы природного и техногенного характера). Из приведенного числа событий разницу времен t_s-t_p в диапазоне $t_s-t_p \leq 60$ с удалось определить только для 1756. Распределение числа этих событий в зависимости от эпицентральных расстояний приведено на рис. 3. Эпицентральные расстояния Δ определялись по региональному годографу, построенному в результате обобщения большого объема данных глубинных сейсмических исследований на ВКМ. Максимальные значения числа событий соответствует интервалам $\Delta=0-20$ и 190-270 км. Штриховкой на рис. 3 выделена гистограмма распределения событий, происшедших в "спокойное" время суток (с 18 до 11 московского времени), когда вероятность записи взрывов или других событий техногенной природы минимальна. Здесь четко выделяется интервал эпицентральных расстояний 190-270 км, в который попадает около 70% всех записей, т.е. также, как и для всех событий. В области малых расстояний (0-20 км) также отмечается повышенное число событий. Принимая во внимание, что обе гистограммы имеют максимум для одних и тех же эпицентральных расстояний, можно отметить, что техногенный фактор не оказывает определяющей роли на общий характер распределения сейсмических событий.

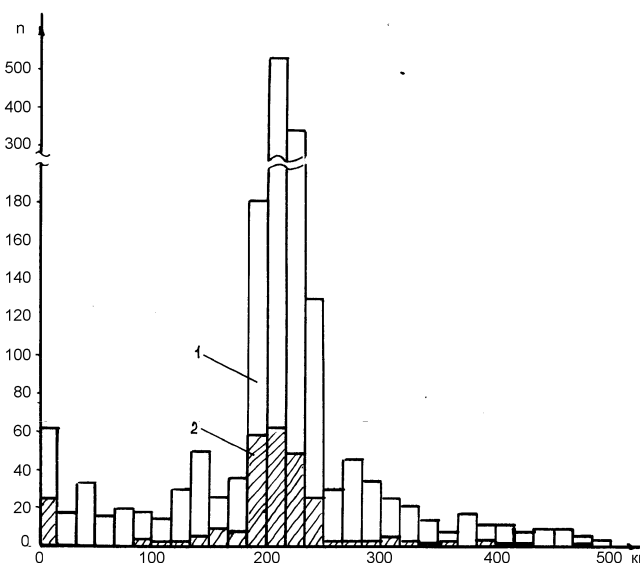


Рис. 3. Распределение событий в зависимости от эпицентрального расстояния

1 – все события, зарегистрированные станцией "Тихий Дон" за 1 год; 2 – события в "спокойное" время суток (с 18 до 11 часов моск. время).

На рис. 4 показаны примеры записи сейсмических событий, зарегистрированных сейсмической станцией "Тихий Дон", которые можно интерпретировать как местные тектонические землетрясения. В целом, косвенные оценки, исторические данные и результаты наблюдений станции "Тихий Дон" однозначно свидетельствуют о сейсмической активности территории Воронежского кристаллического массива.

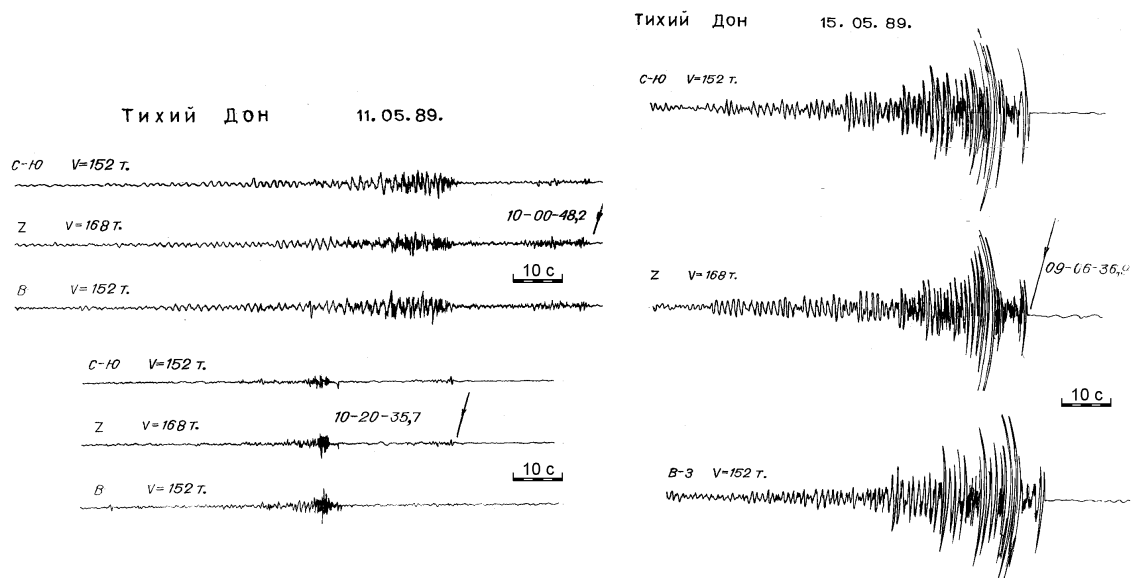


Рис. 4. Примеры записи близких землетрясений на с/ст "Тихий Дон"

С целью получения данных о сейсмичности ВКМ 20 декабря 1996 г. была установлена аналоговая сейсмическая станция "Воронеж", размещенная на окраине г. Воронежа в подвале научно-исследовательского института на глубине 2.5 м от поверхности. Здание расположено на расстоянии 2 км от трассы М4 и ориентировано длинной стороной на север. Координаты станции: $\varphi=50.73^{\circ}\text{N}$, $\lambda=39.20^{\circ}\text{E}$, $h_y=180$ м. Она оснащена регистратором РВЗ-3М и сейсмометрами типа СМ-3КВ, расположенными на бетонном основании толщиной 50 см. Увеличение каналов $V_{\max}=5000$ в полосе периодов $\Delta T=0.30-2.0$ с (рис. 5), скорость развертки – 60 мм/мин. Почва под станцией представлена суглинками.

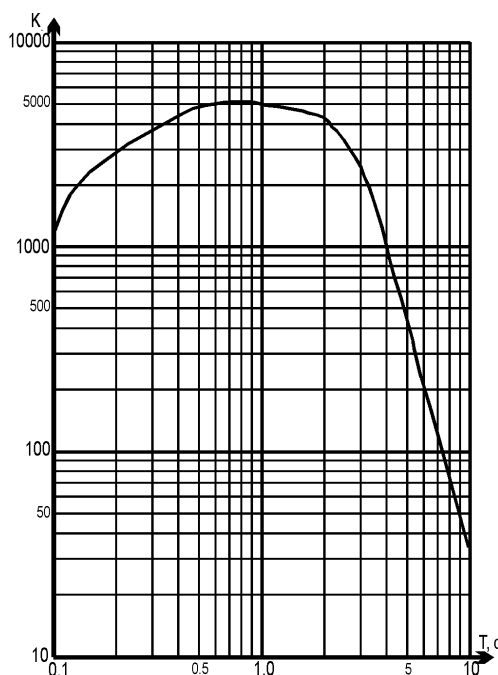


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика каналов регистрации на сейсмической станции "Воронеж"

В геологическом строении района станции принимают участие два различных структурных этажа: осадочный чехол со средней мощностью 280 м и кристаллический фундамент, сложенный дислоцированными кристаллическими породами с абсолютной отметкой –80 м (рис. 6,а). Осадочный чехол сложен породами девонской, меловой, палеогеновой и четвертичной систем. Кристаллический фундамент представлен вулканогенно-осадочными образованиями Лосевской толщи. Кристаллическая кора по данным ГСЗ здесь имеет мощность 45 км (рис. 6,б), в ее разрезе наиболее развит гранитогнейсовый слой, мощность которого составляет в среднем 25 км; мощность "диоритового" слоя – 7-10 км, "метабазитового" – 18 км. В верхнем ("гранитогнейсовом") слое наблюдается увеличение скорости продольных волн с глубиной от 5.8 до 6.3 км/с, в "диоритовом" слое скорость составляет 6.7 км/с. Эти значения скорости типичны для верхней части коры в пределах ВКМ. Пластовая скорость Р-волн в "метабазитовом" слое значительно выше, чем в других частях ВКМ и достигает 7.5 км/с. Верхние мантии характеризуются скоростью продольных волн 8.39 км/с.

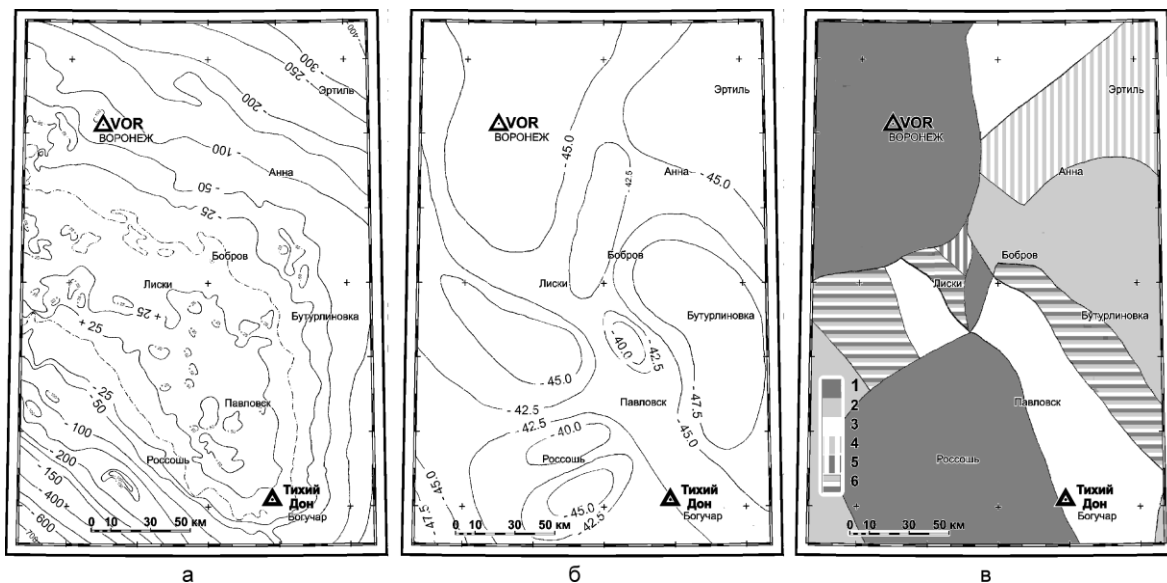


Рис. 6. Структурно геологические условия района расположения сейсмической станции "Воронеж"

а,б – схема рельефа кровли кристаллического фундамента и поверхности Мохоровичича, соответственно; в – схема типов коры: 1 – гранитойдный; 2 – диоритовый; 3 – базитовый; 4 – диорито-базитовый; 5 – гранито-базитовый; 6 – гранито-диорито-базитовый.

Сейсмическая станция "Воронеж" осуществляет регистрацию телесейсмических событий с магнитудой $M \geq 4.0$, региональных и местных: техногенных и тектонических. Распознаваемую и четкую запись создают взрывы в разных карьерах (Михайловский, Стойленский, Лебединский и Павловский на рис. 1). Пример записи их волновой картины представлен группой поверхностных волн на рис. 7,б. Местные тектонические события характеризуются высокочастотной формой записи (рис. 7,а).

Анализ сейсмограмм за 1997 г. позволил выделить 120 местных событий без их локации, поскольку они были записаны лишь одной станцией. Из них были исключены записи заведомо известных взрывов, а также те события, расстояние Δ до которых совпадает с расстоянием до известных карьеров. Распределение оставшихся 57 записей во времени, представленное на рис. 8, имеет, тем не менее, повышенную плотность в дневное время (с 10 до 16 часов), и, следовательно, все взрывы исключить не удалось. Дополнительные трудности возникли при интерпретации записей из-за небольшого увеличения и значительного уровня помех. Оставшиеся в итоге 20 записей (табл. 1) можно предположительно считать записями близких землетрясений в энергетическом диапазоне $K_p=5.3-8.5$.

В целом режимные сейсмические наблюдения на станции "Воронеж" в течение 1997 г. свидетельствуют о наличии тектонических сейсмических событий на расстоянии до 50 км от нее. Учитывая экономико-географическое положение района исследований, его густую заселенность, наличие большого числа экологически ответственных объектов, становится очевидной настоятельная необходимость организации сети сейсмических станций, позволившей бы

осуществлять полноценный мониторинг геологической среды с целью снижения сейсмического риска и обеспечения безопасности региона.

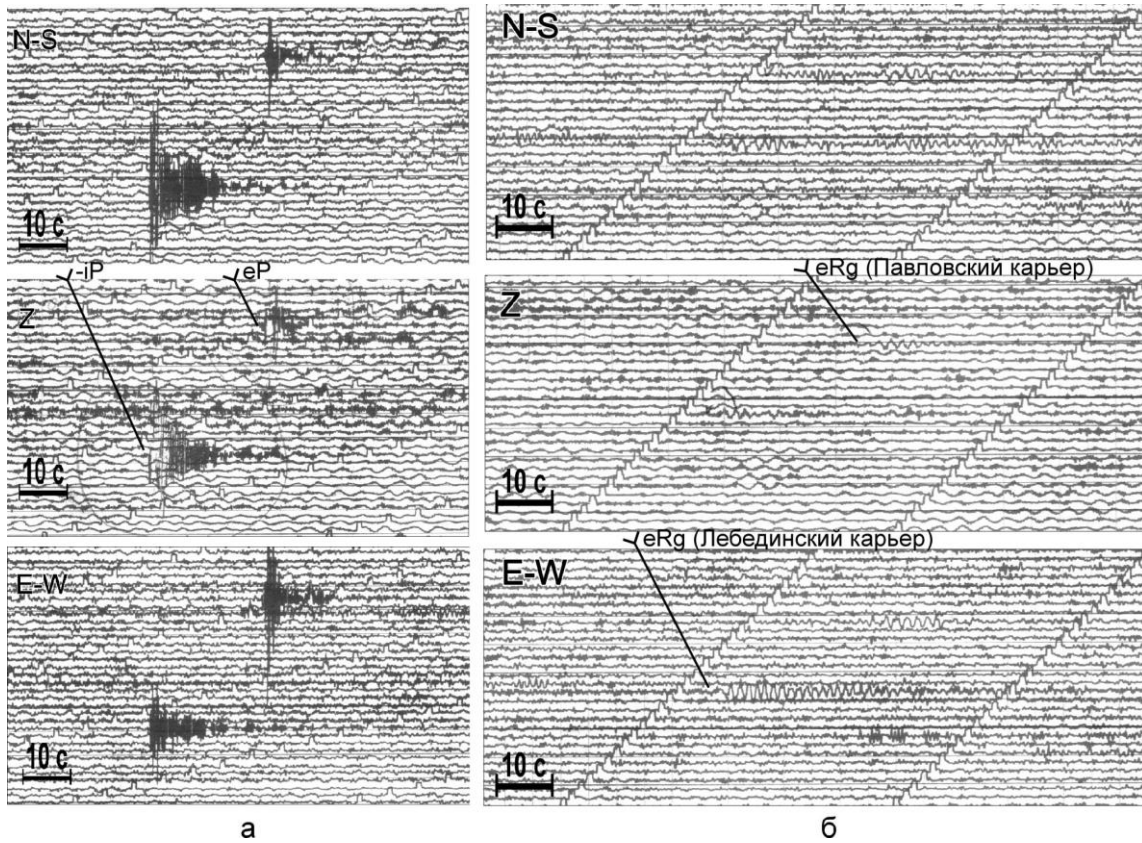


Рис. 7. Примеры записей локальных событий сейсмической станцией "Воронеж"

а – тектонического землетрясения; б – промышленного взрыва.

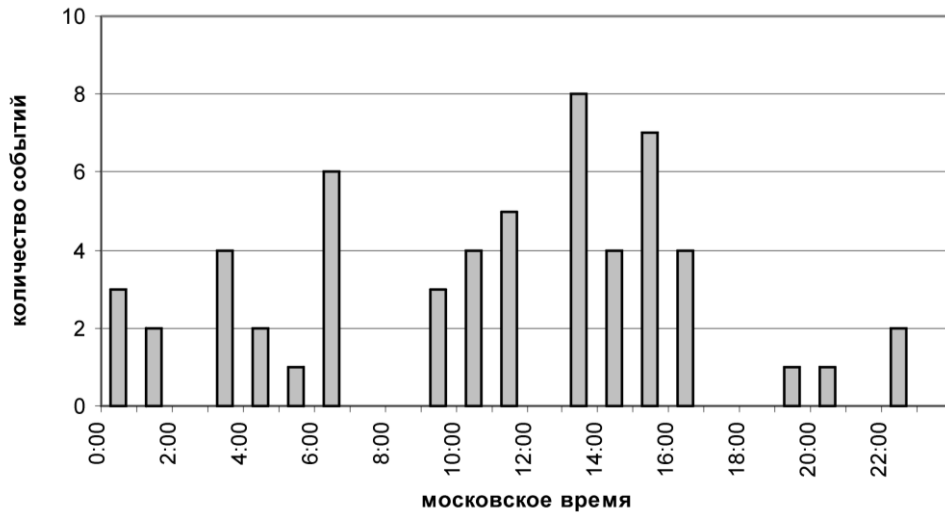


Рис. 8. Гистограмма распределения 57 событий по часам суток

Таблица 1. Бюллетень сейсмической станции "Воронеж" за 1997 г.

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Δ , км	M_p	№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Δ , км	M_p
1	04.01	08 46 54.7	16	6.6	6	11.06	06 26 51.4	11	6.0
2	04.01	19 09 46.2	50	8.5	7	02.07	02 23 02.3	15	6.0
3	20.02	08 17 46.9	11	7.6	8	05.08	07 15 43.0	17	6.7
4	19.05	20 30 31.0	17	6.0	9	05.08	07 22 25.4	8	5.7
5	02.06	09 20 36.1	11	5.8	10	03.09	11 50 12.4	17	6.8

№	Дата, д м	t ₀ , ч мин с	Δ, км	K _p
11	12.12	07 25 36.9	10	6.0
12	12.12	10 48 00.2	10	5.7
13	12.12	11 08 00.9	10	5.9
14	12.12	11 23 43.1	11	5.7
15	12.12	12 45 38.1	10	5.7

№	Дата, д м	t ₀ , ч мин с	Δ, км	K _p
16	12.12	12 49 44.8	11	5.8
17	15.12	19 40 18.7	10	5.3
18	15.12	21 53 22.0	9	5.7
19	15.12	22 30 49.0	11	6.4
20	30.12	11 07 51.1	9	6.2

Л и т е р а т у р а

1. **Раскатов Г.И., Лукьянов В.Ф., Старухин А.А., и др. 1970.** Важнейшие черты тектонической структуры северо-западной части Воронежской антеклизы // Вопросы геологии и полезные ископаемые Воронежской антеклизы. Воронеж: Изд-во ВГУ. С. 64-87.
2. **Раскатов Г.И. 1969.** Геоморфология и неотектоника территории Воронежской антеклизы. Воронеж: Изд-во ВГУ. 163 с.
3. **Раскатов Г.И. 1964.** Неотектоническая структура территории Воронежской антеклизы // Проблемы неотектоники. М.: Наука. С. 29-36.
4. **Тектоника восточной части Воронежского кристаллического массива и его осадочного чехла. 1976.** / Под ред. Г.И. Раскатова. Воронеж: Изд-во ВГУ. 126 с.
5. **Афанасьев Н.С. 1985.** Петрофизика и геологическое строение докембрия Воронежского кристаллического массива // Петрофизические исследования на щитах и платформах. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР. С. 34-42.
6. **Афанасьев Н. С., Египко О. И., Кривцов И. И., Павловский В. М. 1971.** Тектоническое строение и металлогения юго-восточной части Воронежского кристаллического массива по геолого-геофизическим данным // Вопросы разведочной геофизики. Вып. 12. Л.: Наука. С. 121-130.
7. **Красовицкая Р.С., Павловский В.И. 1976.** Характеристика блоковой тектоники докембрия ВКМ // Вопросы комплексирования современных методов геологических исследований. Воронеж: Изд-во ВГУ. С. 9-12. (Материалы совещ. по соврем. методам геол. исследований).
8. **Красовицкая Р.С., Павловский В.И. 1976.** Строение Воронежского Кристаллического массива // Сов. геология. № 8. С. 82-94.
9. **Тарков А.П. 1974.** Глубинное строение Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным. М.: Изд-во Недр. 170 с.
10. **Тарков А.П., Надежка Л.И. 1989.** Об особенностях строения и эволюции литосферы в центральной части Воронежского кристаллического массива // Изв. вузов. Геология и разведка. №2. С. 22-31.
11. **Афанасьев Н.С. 1996.** Петрофизические особенности гранит-мигматит-гнейсовой ассоциации Воронежского кристаллического массива // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геол. Вып.2. С. 164-177.
12. **Чернышов Н.М., Ненахов В.М., Лебедев И.П., Стрик Ю.Н. 1997.** Модель геодинамического развития Воронежского массива в раннем докембрии // Геотектоника. №3. С. 21-31.
13. **Чернышов Н. М. 1978.** Магматические формации докембрия ВКМ и их металлогения // Вопросы геологии и металлогении докембрия Воронежского кристаллического массива. Воронеж: Изд-во ВГУ. С. 55-57.
14. **Чернышов Н.М. 1990.** Металлогеническое районирование Воронежского кристаллического массива в связи с его никеленосностью // Геология рудных месторождений. № 3. С. 3-16.
15. **Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. 1977.** / Отв. ред. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. М.: Наука. 535 с.
16. **Надежка Л.И., Дубянский А.И., Сафронич И.Н., Скребнев А.В. 2000.** Сейсмический режим Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежск. госуд. университета. Геология. №3(9). С. 209-215.
17. **Грачев А.Ф., Магницкий А.В., Мухамедиев Ж.А., Юнга С.А. 1996.** Определение максимальных магнитуд платформенных землетрясений на основе анализа неотектонических и сеймотектонических движений // Докл. РАН. Т.346. №1. С. 108-111.
18. **Грачев А.Ф., Магницкий В.А., Мухамедиев Ш.А., Юнга С.Л. 1996.** К определению максимально возможных магнитуд землетрясений на Восточно-Европейской платформе // Физика Земли. №7. С. 3-20.
19. **Рейснер Г.И. 1980.** Геологические методы оценки сейсмической опасности. М.: Изд-во Недр. 173 с.
20. **Рейснер Г.И., Иогансон Л.И. 1995.** Возможны ли сильные землетрясения в пределах равнинных территорий? // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. М.: Изд-во МЧС России, Межведомственной комиссии по сейсмическому мониторингу, Российской академии наук. № 3. С. 48-50.
21. **Уломов В.И., Шумилина Л.С. 1999.** Проблемы сейсмического районирования территории России. М. ВНИИГПИ. 54 с.