

ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА, УРАЛ и ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ:

УДК 550.348

ВОРОНЕЖСКИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ МАССИВ

Л.И. Надёжка, И.Н. Сафронич, С.П. Пивоваров, М.А. Ефременко, А.Е. Семенов, Б.А. Сорокин

В 1998 г. продолжала работать аналоговая сейсмическая станция «Воронеж». Геологические условия установки и ее характеристики даны в [1]. В феврале 1998 г. на основе пятистороннего Договора о сотрудничестве между Геофизической службой РАН, Объединенным институтом физики Земли РАН, Воронежским государственным университетом, администрацией Воронежской области и дирекцией заповедника «Дивногорье» была введена в эксплуатацию цифровая сейсмическая станция «Дивногорье» (рис. 1). В табл. 1, 2 приведены ее основные характеристики.

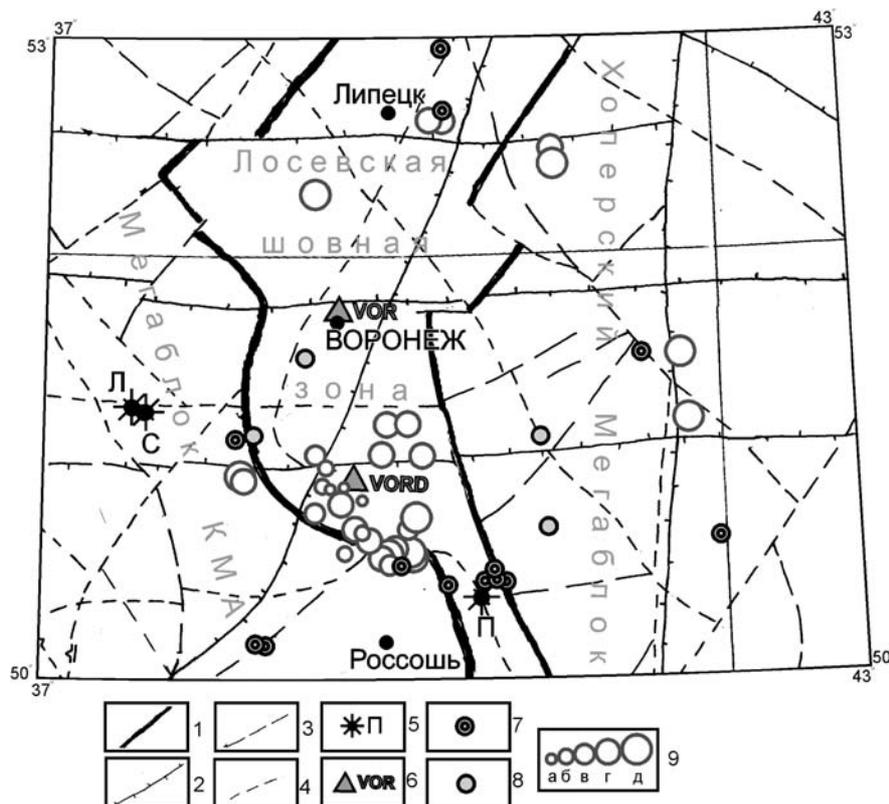


Рис. 1. Карта эпицентров локальных землетрясений в Воронежском кристаллическом массиве за 1998 г.

1 – границы основных структур Воронежского кристаллического массива. 2–4 – тектонические нарушения первого, второго и третьего порядка соответственно; 5 – карьеры (П – Павловский, Л – Лебединский, С – Стойлинский); 6 – сейсмические станции: VOR – «Воронеж», VORD – «Дивногорье»; 7 – эпицентры исторических землетрясений [2, 3]; 8 – эпицентры землетрясений по данным института АЭП; 9 – энергетический класс событий из [4] – $K_p=4, 5, 6, 7, 8$ (соответствуют а, б, в, г, д).

Таблица 1. Основные характеристики места расположения сейсмической станции «Дивногорье»

Название	Код станции	Начало работы	φ°, N	λ°, E	h, m	Подпочва
Дивногорье	VORD	20.02.1998	50.966°	39.293°	94	Мел

Таблица 2. Характеристика каналов регистрации сейсмической станции «Дивногорье»

Название	Код станции	Тип датчика	Перечень каналов	Частотный диапазон, Гц	Частота дискретизации	Разрядность АЦП	Чувствительность велосигграф-отсчет/(м/с)
Дивногорье	VORD	СМЗ-ОС	ВН (N, E, Z) Велосиметр	0.02–10	20	16	Z=6.11·10 ⁸ N=4.01·10 ⁸ E=5.20·10 ⁸

Сейсмическая станция установлена в меловом массиве на крутом берегу р. Тихая Сосна. Рельеф кристаллического фундамента здесь имеет отметку около +25 м (рис. 2а). В районе станции кристаллический фундамент представлен гнейсами обоянской серии архея. В структурном плане станция расположена в Лосевской шовной зоне, разделяющей крупные структуры докембрия: Курский и Хоперский мегаблоки (рис. 1) [5]. Мощность земной коры в этом районе около 42.5 км (рис. 2б). Кристаллическая кора представлена тремя слоями: гранито-гнейсовым, диоритовым и метабазитовым с преобладанием мощности метабазитового слоя и относится к гранито-диорито-метабазитовому типу (рис. 2в) [6]. Мощность осадочного чехла в районе составляет 70–100 м, сложен он пясчким мелом, известняками, песками и глинами в основном меловой и девонской систем. Сверху разрез перекрыт четвертичными отложениями небольшой мощности (в районе сейсмической станции – несколько сантиметров) и представлены они супесями. Как видно из рис. 3, сейсмическая станция «Дивногорье» фактически расположена в зоне сочленения крупных неотектонических структур: Среднерусской антеклизы и Окско-Донской впадины.

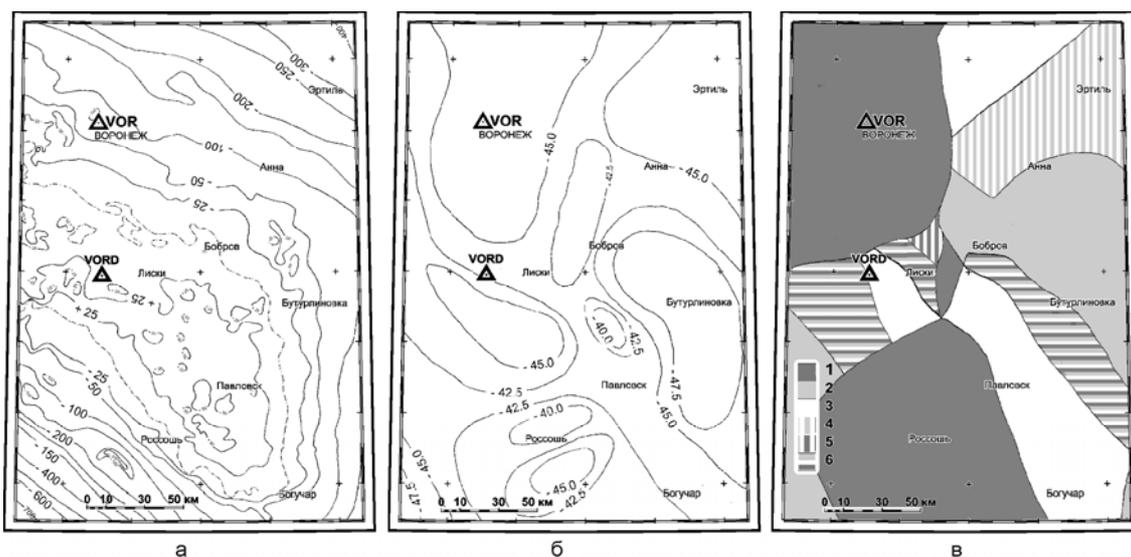


Рис. 2. Структурно-геологические условия района расположения сейсмических станций «Воронеж» и «Дивногорье»

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

На рис. 4 представлен характер сейсмического шума в районе станции «Дивногорье». Как хорошо видно, определяющую роль в его уровне играют микросейсмы. Максимум их амплитуды отмечается на частотах 0.15–0.30 Гц и достигает значения 0.04 м/с. Начиная с частоты 0.5 Гц и до 8 Гц, все составляющие шума существенно ниже 0.01 м/с. При этом Z-составляющая в области частот 0.7–1.4 Гц существенно ниже 0.001 м/с, относительное повышение (до 0.001 м/с) наблюдается на частотах в области 3 Гц. Горизонтальные составляющие волнового поля имеют локальный максимум в области частот 1.0–1.3 Гц, но по уровню он не превышает 0.004 м/с.

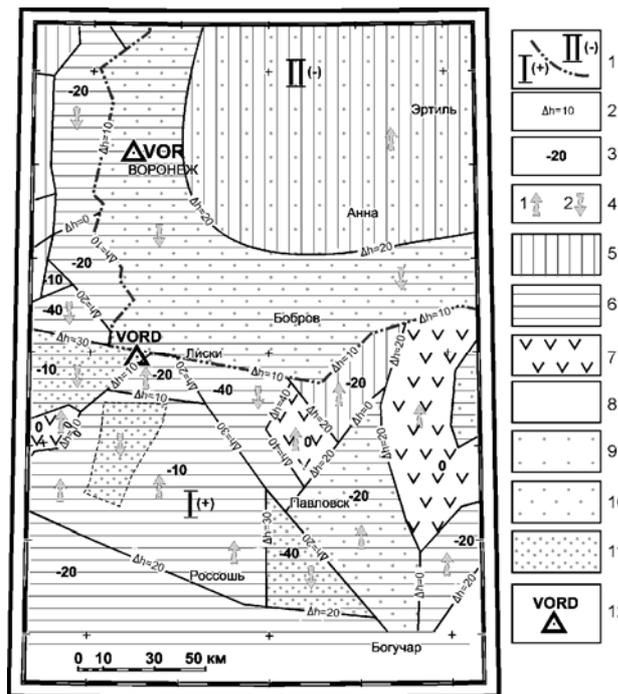


Рис. 3. Выкопировка из схемы неоген-четвертичной динамики восточной части ВКМ (автор Э.А. Молоткова [7])

1 – граница Среднерусской антеклизы (I) и Окско-Донской впадины (II); 2 – амплитуда разнонаправленных движений структур различного ранга относительно друг друга за четвертичный этап развития (в метрах); 3 – гипсометрическое положение блоков в четвертичное время относительно неогенового уровня (в метрах); 4 – знаки современных тектонических движений, испытывающих тенденции: 1 – поднятия; 2 – опускания; 5 – блоки, испытывавшие поднятие за четвертичное время относительно неогеновых структурных реперов, (горизонты красноцветных аллювиальных образований); 6 – блоки, испытывавшие опускание за четвертичное время относительно неогеновых структурных реперов; 7 – стабильные блоки. Мощности четвертичных отложений (в метрах): 8 – до 10; 9 – до 20; 10 – до 30; 11 – более 30. 12 – Расположение сейсмических станций «Воронеж» (VOR) и «Дивногорье» (VORD).

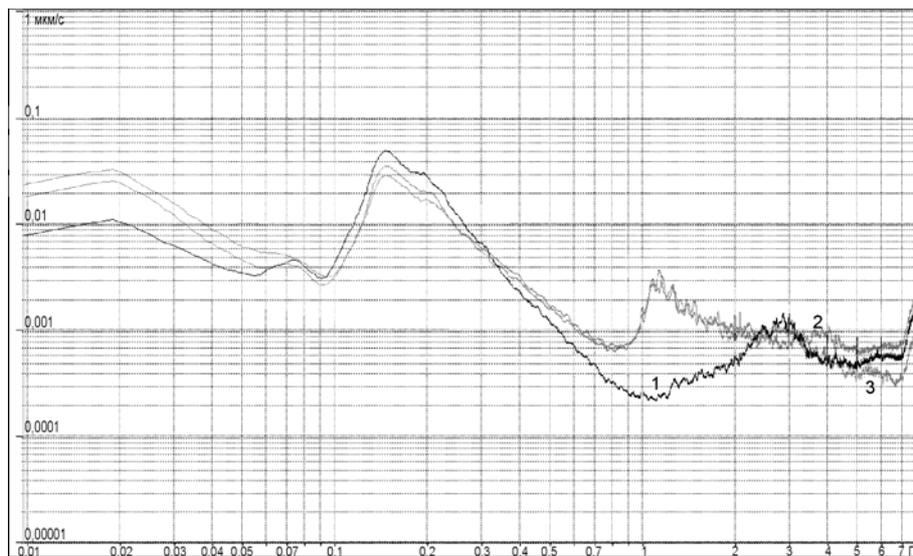


Рис. 4. Среднесуточный спектральный состав сейсмического шума на станции «Дивногорье»

1–3 – составляющие Z, N, E соответственно.

Характер сейсмического шума и его относительно низкий уровень в районе сейсмической станции «Дивногорье» дали возможность достаточно уверенно регистрировать события различного энергетического класса K_p и разной природы. В настоящей статье основное внимание было уделено анализу волновых форм локальных событий. По форме выраженности отдельных типов волн и спектральному составу всего процесса сейсмические записи локальных событий можно разделить на три группы. К первой группе отнесены записи событий типа «взрыв», ко второй – типа «импульс», и к третьей группе отнесены события типа «землетрясение».

На исследуемой территории работают крупные карьеры (рис. 1), в которых производятся промышленные взрывы общей мощностью до 100 и более тонн. Записи этих взрывов имеют характерные особенности и хорошо регистрируются как аналоговой, так и цифровой станциями. Волновые формы взрывов, производимых в различных карьерах, имеют специфические черты. Это обусловлено как методикой взрывных работ, так и особенностями геологической среды в месте взрыва и на пути распространения сейсмических волн, а также расстоянием

от источника до приемника. На рис. 5а представлены примеры записи массового взрыва в Лебединском карьере Курского мегаблока (расстояние – 1.09°). Как видно, достаточно уверенно фиксируется первое вступление волны Pg , далее идут пакеты отраженных волн от границ в земной коре. Волна Sg , как правило, не наблюдается. Достаточно хорошо представлены волны Lg и Rg . На записях взрывов из карьера г. Павловска более ярко выражена высокочастотная часть, увереннее выделяется вступление Pg , иногда выделяется Sg , четче фиксируются отраженные волны от основных границ в земной коре.

Ко второй группе локальных событий отнесены интенсивные, но короткие по продолжительности события типа «импульс», превышающие по амплитуде уровень фона в три и более раз и записываемых по всем трем компонентам (рис. 5б). Как правило, на записях выделить различные типы волн практически невозможно. Таких событий регистрируется достаточно много. Временное распределение, приведенное на рис. 6, показывает, что максимальное их число наблюдается с третьей декады марта по третью декаду апреля. Второй максимум, хотя и не так четко выражен, наблюдается в июне. Природа этих событий пока остается неясной. Мы предполагаем, что они могут быть связаны с образованием или «схлопыванием» трещин в верхней части земной коры.

К третьей группе относятся сейсмические события типа «землетрясение». На рис. 5в дан пример записи таких событий. Эпицентр события находится на расстоянии 0.4°. Первое вступление образовано рефрагированной волной Pg относительно слабой интенсивности. Продолжением этой волны является интенсивное высокочастотное колебание. Скорее всего, это отраженные волны от верхнекоровых границ. Также достаточно хорошо выделяются волны Lg и Rg . Подробно описание волновых форм различных событий дано в работе [8].

Обработка землетрясений, записанных одной станцией, проводилась в соответствии с «Инструкцией о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях единой системы сейсмических наблюдений СССР» [9], с использованием программы WSG [7]. Энергетический класс K_p землетрясений определялся по замерам максимальных амплитуд продольных и поперечных волн с использованием номограммы Т.Г. Раутиан [10]. Совместный анализ данных аналоговых сейсмических станций «Воронеж» и «Дивногорье» позволил составить каталог локальных землетрясений. В него вошли 34 события [4]. Распределение событий по энергетическим классам в пределах трех районов дано в табл. 3, согласно которой годовое значение выделившейся в очагах сейсмической энергии составило $\Sigma E = 11.72 \cdot 10^8$ Дж.

Таблица 3. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_p и суммарная сейсмическая энергия ΣE по районам

№	Район	K_p						N_{Σ}	$\Sigma E \cdot 10^8$, Дж
		3	4	5	6	7	8		
1	Курский мегаблок	–	–	1	1	4	4	10	6.1697
2	Лосевская шовная зона	1	2	3	3	9	2	20	4.0542
3	Хоперский мегаблок	–	–	–	–	1	3	4	1.4969
	Всего	1	2	4	4	14	9	34	11.7208

Оценка точности определения расстояния до эпицентров выполнена на основе анализа ошибки определения расстояния до карьеров, в которых производились взрывы. При этом использовались данные по двум карьерам: близкому – Павловскому ($\Delta = 0.91^\circ$) и далекому – Железногорскому ($\Delta = 2.76^\circ$). Для расчета было взято по 11 обработанных карьерных взрывов по каждому карьере. В результате среднеквадратическое отклонение определения расстояния составило 2.0 км для Павловского карьера и 4.0 км – для Железногорского. Эти данные использовались при разбраковке сейсмических событий. При составлении каталога все события типа «землетрясение» анализировались с целью определения природы. Основными критериями при этом были: спектральный состав, время в очаге, пространственная локация. Если два или более события имели близкие координаты эпицентра, т.е. расстояние между положениями эпицентров было меньше утроенной ошибки определения расстояния до далекого карьера (худший вариант), то сравнивалось время событий, более детально анализировались их волновые формы и спектральный состав.

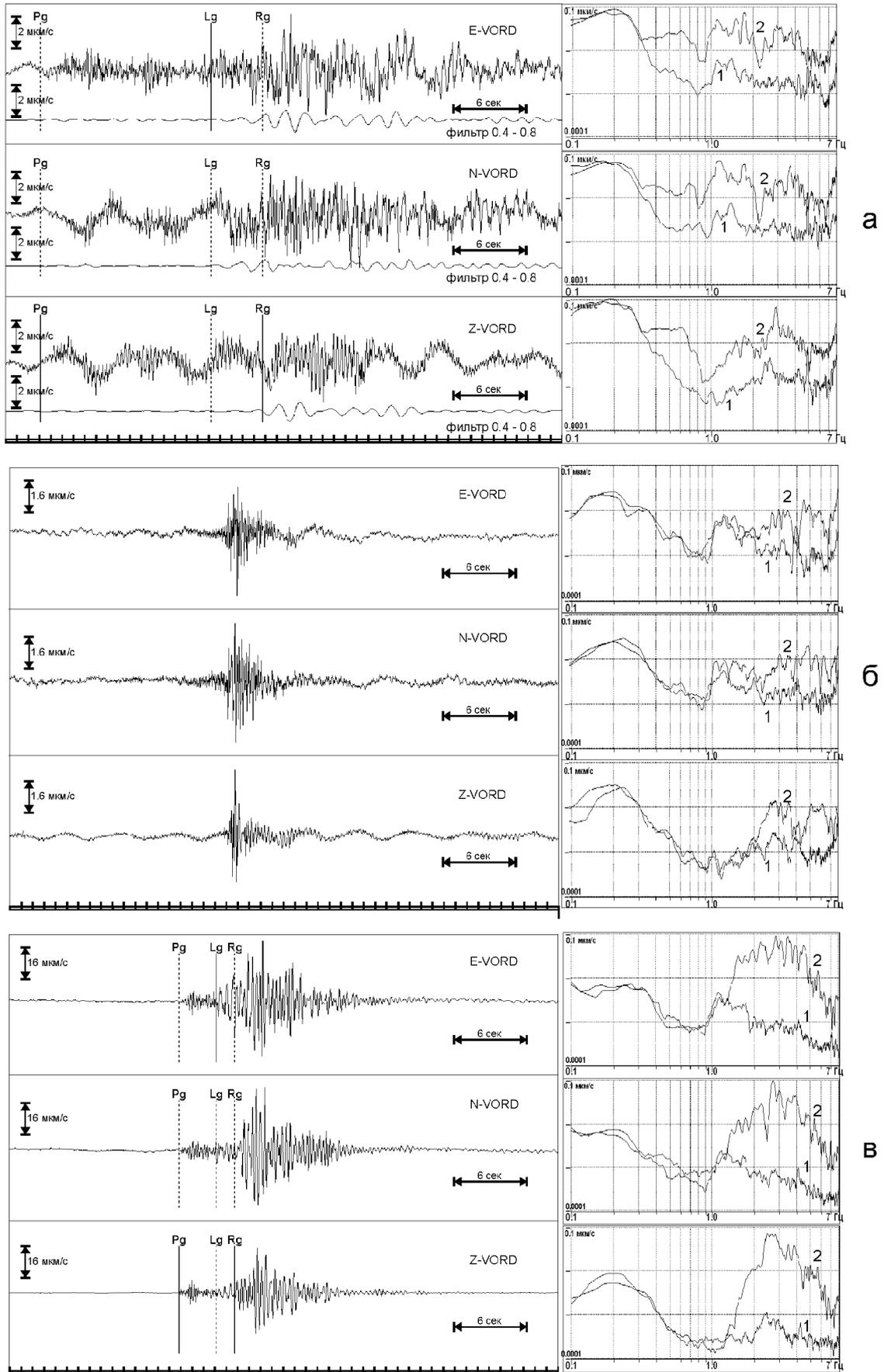


Рис. 5. Пример записи событий различного типа и их спектральный состав до (1) и во время (2) события
 а – карьерный взрыв ($\Delta=1.09^\circ$); б – событие типа «импульс»; в – типа «землетрясение» ($\Delta=0.4^\circ$).

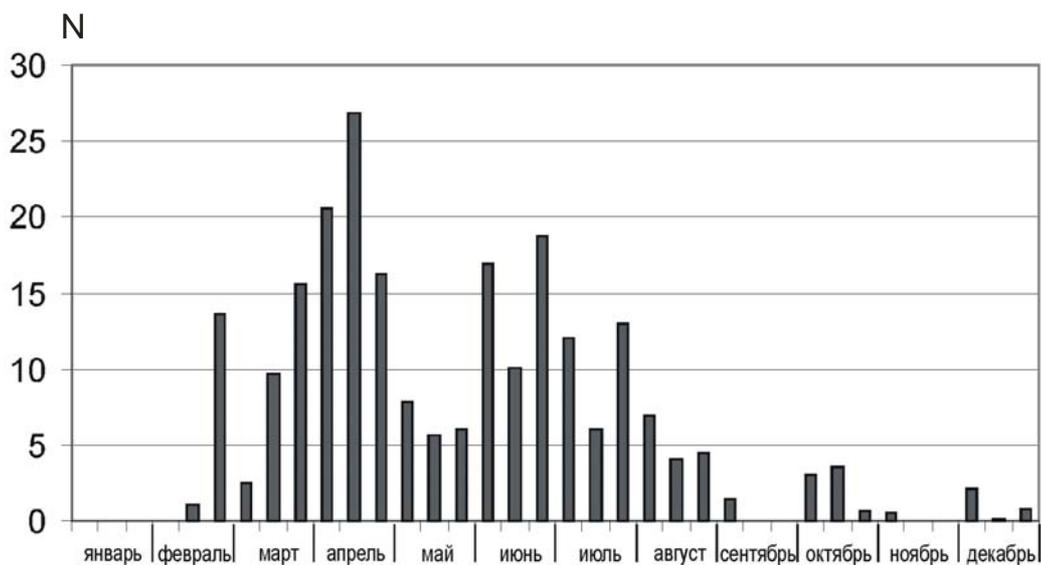


Рис. 6. Подекадное среднесуточное распределение числа N событий типа «импульс»

На примере событий, представленных на рис. 5, можно видеть особенности спектров трех типов локальных событий: взрыва, импульса и землетрясения. Хорошо видно, что спектры импульса и землетрясения подобны. Они характеризуются увеличением амплитуд на частотах в основном от 2 и более Гц, в то время как в спектре записи взрыва существенное увеличение амплитуд по всем составляющим наблюдается, начиная с 0.3 Гц. Это свидетельствует о том, что в записи взрыва большую роль играют поверхностные волны с частотой 0.3–0.8 Гц, а в записи событий типа «импульс» и «землетрясение» роль этой составляющей невелика. Эта особенность спектра является одним из важных признаков отбраковки событий типа «взрыв». Другим дополнительным признаком являлось пространственное распределение в регионе известных карьеров, а также информация о производстве плановых взрывов. События отбраковывались, если хотя бы по одному из признаков его можно было классифицировать как «взрыв». На рис. 7 представлено временное распределение локальных событий типа «землетрясение» по энергетическому классу и глубине. Как видно, это в основном верхнекоровые землетрясения, которые происходят на глубине порядка 2 км. Вместе с тем 8 землетрясений имеют глубину 5 км. Большую часть землетрясений можно отнести к 7–8-энергетическому классу. Распределение по времени суток показывает, что некоторое число событий происходит в дневные часы (15–17 часов московского времени). Однако по характеру волновых форм и спектра, пространственному распределению эти события с большой долей вероятности являются тектоническими. Отсутствие в районе эпицентров этих событий промышленных карьеров, где бы производились регулярные или нерегулярные взрывы, а также пространственная их приуроченность к геодинамически активному тектоническому элементу региона послужили основанием для того, чтобы отнести эти события к землетрясениям.

Пространственное распределение эпицентров землетрясений показано на рис. 1. Для сравнения нанесены эпицентры исторических землетрясений. Информация о них взята из [2, 3]. На этом рисунке видно, что большинство эпицентров приурочено к западному борту зоны сочленения крупных литосферных структур региона: Курского мегаблока и Лосевской шовной зоны. В некоторых случаях наблюдается пространственная корреляция эпицентров локальных землетрясений за 1998 г. и исторических. Отдельные очаги приурочены к крупным разломам второго порядка. В целом их пространственное распределение достаточно хорошо коррелируется с основными тектоническими элементами кристаллической коры региона.

Таким образом, сейсмическими станциями зарегистрированы в восточной части Воронежского кристаллического массива сейсмические события тектонической природы. И хотя энергетический класс $K_p < 9$ и их гипоцентры приурочены к верхнему пятикилометровому горизонту, они являются отражением современных тектонических процессов, происходящих в платформенной литосфере. Приуроченность большинства из них к крупным тектоническим нарушениям свидетельствует о современной их активизации в отдельных фрагментах.

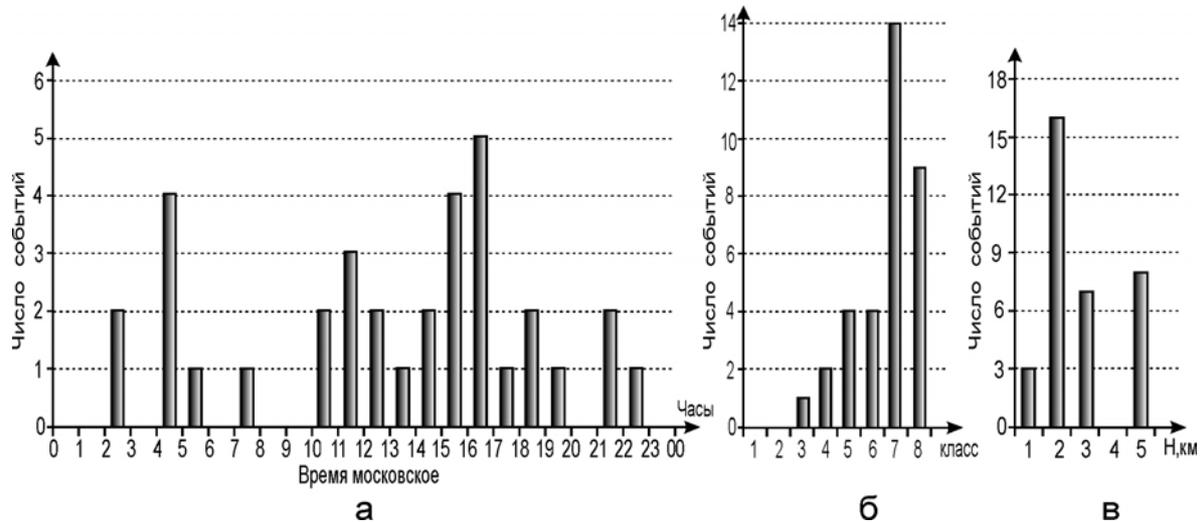


Рис. 7. Распределение числа локальных событий типа «землетрясение»
а – по времени суток; б – по энергетическому классу; в – по глубине.

Л и т е р а т у р а

1. Старовойт О.Е., Надёжка Л.И., Дубянский А.И., Сафронич И.Н., Пивоваров С.П., Савенков А.В. Некоторые черты строения Воронежского кристаллического массива и первые результаты сейсмических наблюдений на его территории // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. – Обнинск: ФООП, 2003. – С. 156–163.
2. Ананьин И.В. (отв. сост.), Вороновская А.И., Ломакин В.С., Силина И.К., Смирнова В.А., Шебакин Н.В. Европейская часть СССР, Урал и Западная Сибирь [1467–1974 гг.; $M \geq 3.0$; $I_0 \geq 4$] // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 465–470.
3. Никонов А.А. Каталог тектонических землетрясений центральной части Восточно-Европейской платформы (49–58° N; 34–42° E) в XIX–XX вв. // Геодинамика и геоэкология. Материалы Международной конференции. – Архангельск: Институт экологических проблем Севера УрО РАН, 1999. – С. 271–273.
4. Надёжка Л.И., Сафронич И.Н. (отв. сост.), Пивоваров С.П., Савенков А.В., Сорокин Б.А., Семенов А.Е., Колесникова С.И. Воронежский кристаллический массив (См. раздел IV (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
5. Чернышов Н.М., Ненахов В.М., Лебедев И.П., Стрик Ю.Н. Модель геодинамического развития Воронежского массива в раннем докембрии // Геотектоника. – 1997. – № 3. – С. 21–31.
6. Надёжка Л.И., Дубянский А.И., Кашубин С.Н., Афанасьев Н.С., Груздев В.Н., Тарков А.П., Дубянский В.И. Основные типы земной коры по геофизическим данным. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей (Труды Международной конференции). – Воронеж: ВГУ, 1998. – С. 300–307.
7. Надёжка Л.И., Дубянский А.И., Молоткова Э.А., Афанасьев Н.С., Груздев В.Н., Вассерман И.С., Морено-Пальи Л.П., Золототрубова Э.И. Уточнение результатов детального сейсмического районирования 150 км зоны (М 1:500000) и 30 км зоны (М 1:50000) вокруг НВАЭС // Отчет. Фонды ВГУ. – 1999. – 272 с.
8. Надёжка Л.И., Сафронич И.Н., Пивоваров С.П., Ефременко М.А. Сейсмические волновые процессы в нелинейной и неоднородной литосфере // Волновые процессы в неоднородных и нелинейных средах. Материалы семинаров. – Воронеж: ВГУ, 2003. – С. 275–294.
9. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. – М.: Наука, 1981. – 267 с.
10. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика (Тр. ИФЗ АН СССР; № 32(199)). – М.: Наука, 1964. – С. 88–93.