

УДК 550.348.(571.66)

DOI 10.46916/12102022-978-5-00174-715-4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА НАКАМУРЫ ДЛЯ ЗОНИРОВАНИЯ ПОРОД В КРОВЛЕ ДОКЕМБРИЙСКОГО ФУНДАМЕНТА

Сафронич Игорь Николаевич

младший научный сотрудник

ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

Аннотация: Приведены результаты исследования расположенной в кровле докембрийского фундамента Хопёрского мегаблока Воронежского кристаллического массива (ВКМ) двухфазной Ёлкинской интрузии перекрытой осадочным чехлом. Использовались первичные записи, ранее полученные при проведении сейсмического микрорайонирования Ёлкинского лицензионного участка. Трёхкомпонентные сейсмические записи микросейсмического шума были обработаны по авторской методике и получены трёхкомпонентные спектральные модели микросейсмического фона. Рассматривая нормированные отношения спектров Накамуры моделей «полевых» пунктов наблюдений к «базовому», получено, что пункты наблюдений, имевшие в диапазоне частот 2-5.5 Гц минимальные значения отношения, пространственно были приурочены к диоритам мамонского комплекса, а имевшие максимальные значения группировались в зоне норитов еланского комплекса. Результаты показывают принципиальную возможность и перспективность использования спектра Накамуры для зонирования пород кровли докембрийского фундамента ВКМ, а также структуры многофазных интрузий.

Ключевые слова: Воронежский кристаллический массив, двухфазная интрузия, модель микросейсмического фона, спектр Накамуры.

USING THE NAKAMURA SPECTRUM FOR ZONING ROCKS IN THE ROOF OF THE PRECAMBRIAN FOUNDATION

Safronich Igor Nikolaevich

Abstract: The results of a study of a two-phase Elkin intrusion overlain by a sedimentary cover located in the roof of the Precambrian basement of the Khopersky megablock of the Voronezh Crystal massif (VCM) are presented. The primary

records previously obtained during the seismic microdistricting of the Elkinsky license area were used. Three-component seismic recordings of microseismic noise were processed according to the author's methodology and three-component spectral models of microseismic background were obtained. Considering the normalized ratios of the Nakamura spectra of the models of "field" observation points to the "base", it was found that the observation points that had minimum ratio values in the frequency range 2-5.5 Hz were spatially confined to the diorites of the Mammon complex, and those with maximum values were grouped in the zone of the norites of the Elan complex. The results show the fundamental possibility and prospects of using the Nakamura spectrum for zoning the roof rocks of the Precambrian foundation of the VCM, as well as the structure of multiphase intrusions.

Key words: Voronezh crystalline massif, two-phase intrusion, microseismic background model, Nakamura spectrum.

Введение. Во всем мире развитие пассивных методов сейсмических исследований обусловлено их основными преимуществами: экологической чистотой; меньшими затратами ресурсов; возможностью изучения геологической среды в её невозмущённом состоянии. Сегодня методы пассивной сейсморазведки с использованием микросейсмического поля (МП) успешно применяются для решения широкого круга прикладных задач: поиска, разведки нефти и газа, сейсмического микрорайонирования территорий, картирования погребённых сейсмически контрастных объектов, тектонических нарушений [1-5]. Это показывает, что в МП присутствует фоновая составляющая – фоновое микросейсмическое поле (ФМП), в котором содержится вся полезная геолого-геофизическая информация об исследуемой территории.

Регистрируемые сейсмической станцией в пункте наблюдения МП представляют собой запись процесса (микросейсмический шум (МШ)), который является суперпозицией колебаний от большого числа природных и антропогенных источников. Исследования вариаций его уровня на территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ) показали, что в нём кроме антропогенной нагрузки, «сейсмических бурь», волновых полей от взрывов и землетрясений, транспортных помех присутствует, создаваемый в пункте наблюдения вариациями ФМП, процесс – микросейсмический фон (МФ) [6].

Проблема использования ФМП на ВКМ связана с высоким уровнем техногенных помех, который превышает в несколько раз амплитуды МФ, что оказывает существенное влияние на результат и ограничивает его

использование при изучении платформенных территорий. В работе представлен авторский способ обработки записей микросейсмического шума для изучения, перекрытой осадочным чехлом пород, кровли докембрийского фундамента ВКМ.

Описание метода. В основе большинства методов пассивной сейсморазведки используется амплитудно-частотная характеристика МШ в пункте наблюдения, которая рассматривается как распределение «параметра» по глубине (ниже частота – больше глубина). Обычно характеристика получается путём статистической обработки спектров, рассчитанных с помощью преобразования Фурье для фрагментов из выбранного интервала записи. В результате использования стандартного способа обработки, без учета свойств и особенностей МШ, она содержит составляющие помех, которые вносят искажения в результат геофизической интерпретации.

Исследование микросейсмического фона в пунктах наблюдения на ВКМ показало, что в отличие от других процессов, присутствующих в микросейсмическом шуме, только вариация уровня МФ является непрерывным, широкополосным и однородным процессом [6]. Это значит что, только МФ на записях присутствует всегда, отсутствуют диапазоны частот, в которых не было бы его составляющих, а рассчитанная для уровня МФ средняя амплитуда каждой гармоники является типичной величиной, т.е. на выбранном интервале записи она является «постоянной» составляющей уровня микросейсмического шума.

Авторский метод и алгоритм расчёта такой амплитудно-частотной характеристики – модели микросейсмического фона (модели МФ), адаптированный для расчёта в процессоре обработки сигналов программы WSG, описан в работах [6, 7]. В работе [6] модель МФ соответствует «Оценки MIN» полученной на интервале записи, включающем в ночное время. С её помощью выделяется амплитудный спектр, характеризующий амплитудно-частотный состав постоянно действующих на записи процессов: МФ и техногенной нагрузки. Суточный интервал записи исключает влияние на модель МФ техногенной нагрузки, которая имеет ярко выраженную суточную периодичность.

Анализ моделей, рассчитанных на суточном интервале записи, показал, что получаемые суточные модели МФ в каждом пункте на платформенной территории (ВКМ) достаточно стабильны; модели МФ в разных пунктах имеют значимые различия; хотя в отдельных диапазонах частот они совпадают (рис. 1). На рис. 1а собраны суточные модели уровня вертикальной

составляющей в одном и том же пункте наблюдения в течение зимнего месяца. Как видно из рис. 1а, наиболее стабильным диапазоном частот является 1.0–10 Гц. В диапазоне частот ниже 1 Гц более половины моделей также группируются возле минимальных значений. Повышенные значения в этом диапазоне частот у оставшихся моделей МФ объясняется присутствием в этих суточных записях «сейсмической бури», длительность которой может достигать нескольких суток, что для алгоритма расчёта также является «постоянной» составляющей.

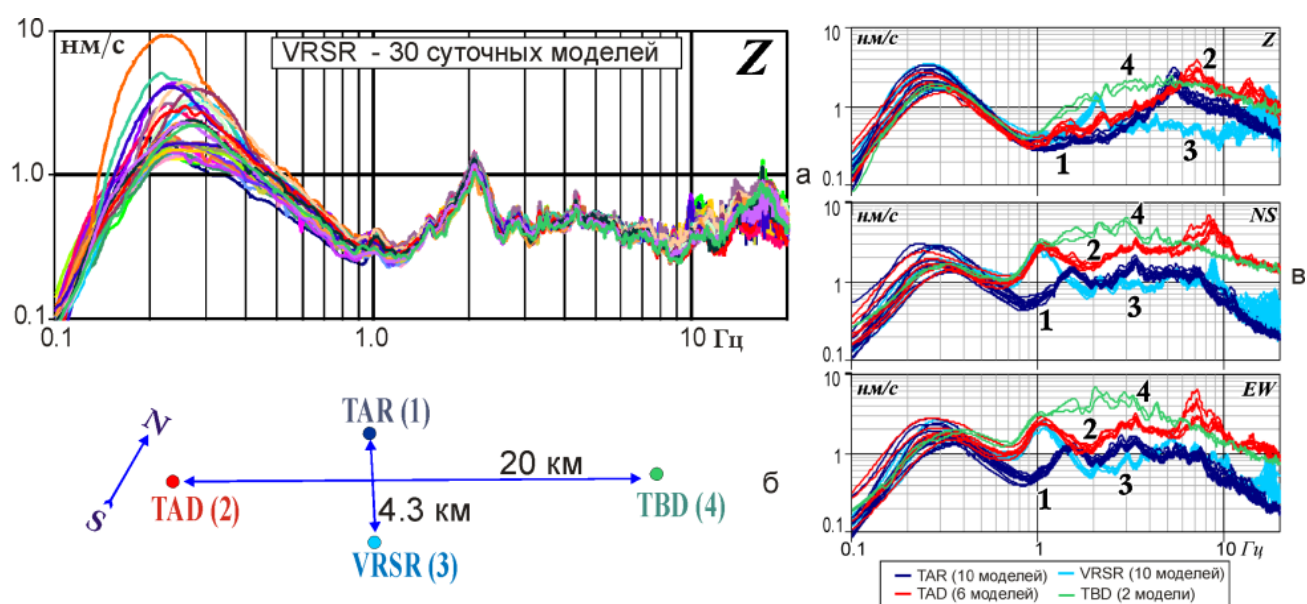


Рис. 1. Сравнение суточных моделей вертикальной составляющей МФ в пункте наблюдения VRSR («Сторожевое») за один месяц (а), расположение ближайших к VRSR полевых пунктов наблюдений (б), и рассчитанные для них трёхкомпонентные суточные модели микросейсмического фона (в)

Таким образом, это показывает, относительную стабильность источников фонового микросейсмического поля на платформенной территории и позволяет использовать суточную модель для характеристики МФ в пункте наблюдения. На рис. 1б представлено пространственное расположение четырёх пунктов наблюдений, для которых построены несколько трёхкомпонентных суточных моделей МФ (рис. 1в).

Как видно из рис. 1в, трёхкомпонентные суточные модели МФ хорошо группируются по пунктам наблюдений, при этом в разных пунктах наблюдений расположенных на площади 5×20 км, они имеют существенные различия.

В диапазоне частот штормовых микросейсм ($0.1\text{--}0.4\text{ Гц}$) присутствует также группировка по станциям, работавшим одновременно, т.е. можно считать, что суточные модели для всех пунктов наблюдений совпадают до частоты 1.0 Гц кроме горизонтальных моделей пункта наблюдения ТАР, которые расходятся после 0.5 Гц . На более высоких частотах наблюдаются пересечения моделей в отдельных диапазонах частот. Используя предположение, о том, что амплитудно-частотный состав фона является аналогом распределения с глубиной параметра зависящего от геологического строения, можно дать его осмысленную интерпретацию: *геологическое строение под пунктами наблюдения, ниже какой-то глубины, совпадает, а зоны пересечения моделей могут соответствовать однотипному строению отдельных геологических ярусов под соответствующими пунктами наблюдений*. Тогда, следуя данной логике, можно сформулировать важное предположение, которое можно проверить: **суточные модели МФ в пунктах наблюдения с близким геологическим строением не должны иметь существенных отличий**.

Описание фактического материала. Для проверки предположения используем Ёлкинский интрузивный массив хорошо изученный геолого-геофизическими методами. Он расположен в кровле докембрийского фундамента Хопёрского мегаблока ВКМ и перекрыт осадочным чехлом мощностью 200 м . Площадь Ёлкинского интрузивного массива составляет менее 10 км^2 . Двухфазный интрузивный массив представлен ассоциациями пород: габбро-диоритами, биотит-роговообманковыми и роговообманковыми кварцевыми диоритами мамонского комплекса, а также норитами мелано-, мезо-, лейкократовыми и норит-порфиритами еланского комплекса (рис. 2). То есть является для целей исследования хорошим, компактным «тестовым» объектом, состоящим из двух типов пород с близкими петрофизическими характеристиками, осложняющими их зонирование стандартными геофизическими методами.

В качестве исходных данных использовались сейсмические записи, полученные при проведении сейсмического микрорайонирования Ёлкинского лицензионного участка. Пункты регистрации микросейсмического поля располагались по площади интрузии на расстоянии от 300 до 600 м между ними (рис. 2).



Рис. 2. Выкопировка из схематической геологической карты докембрийских образований (отв. исп. И.И. Кривцов) с расположением пунктов регистрации микросейсмического поля

Длительность записи была меньше суток и варьировалась от 5 до 11 часов. Работы выполнялись с базовым пунктом наблюдения BASE, который работал постоянно, и был расположен вне интрузии над вмещающими породами. Полевые работы выполнялись однотипными сейсмическими станциями Reftek 130-01 с датчиками L-4C-3D. При выборе мест размещения пунктов наблюдения не учитывалась имеющаяся геологическая информация, а использовалась в основном их транспортная доступность, т.е. пункты располагались вблизи и возле пересечений полевых дорог. Полученные «дневные» записи, как правило, небольшой длительности (5–6 часов) и содержат, кроме большого количества помех от близко движущегося транспорта, также техногенную нагрузку от прочих неустановленных источников на большом удалении. Таким образом, имевшиеся данные не позволяли получить модели МФ, свободные от техногенной нагрузки. Поэтому для совместного использования всех материалов необходимо было найти решение этой проблемы.

Способ решения возникшей проблемы. Обычно при аналогичных глубинных исследованиях используются записи только вертикальной составляющей микросейсмического шума [2]. Для проверки возможность совместного анализа моделей использовались полученные в разное время суток

фрагменты в пункте BASE. Рассматривались 5-часовые трёхкомпонентные модели МФ с использованием авторского алгоритма разработанного для процессора обработки программы WSG [6,7]. Для расчёта каждой компоненты модели использовано 600 фрагментов трехкомпонентной записи длительностью 81.92 с (8192 Отсч.), выбранных из исходного интервала с 30-секундным сдвигом. Полученные модели вертикальных составляющих существенно отличались для разного времени суток (день, ночь, утро и вечер). Но оказалось, что рассчитанные для них спектры Накамуры (CH) [5], различаются не более чем на 30%. Это позволяет скорректировать полученные в разное время суток модели вертикальных составляющих МФ (M_{Zt_i}). Скорректированную модель вертикальной компоненты для текущего интервала времени (t_i) (далее назовем ее Z-моделью, или ZM_{t_i}) будем рассчитывать как отношение:

$$ZM_{t_i} = \frac{M_{Hbase}}{SN_{t_i}}, \quad (1)$$

где $SN_{t_i} = \frac{M_{Ht_i}}{M_{Zt_i}}$ – спектр Накамуры для текущего интервала времени t_i , а

$$M_{Hbase} = \frac{(M_{NSbase} + M_{EWbase})}{2}$$

полусумма горизонтальных компонент моделей МФ, интервала времени выбранного в качестве «базового».

Вычисленные по формуле (1) Z-модели для тех же интервалов времени, по сравнению с исходными моделями Z-каналов МФ, не имеют существенных отличий. Их отношения показывают относительную стабильность, что позволяет использовать любую из этих Z-моделей в качестве «Базовой» для совместного анализа всего имеющегося материала.

Результаты исследования. Формула (1) является универсальной, т.е. если применить её к моделям МФ для полевых пунктов, то получим Z-модели, «приведённые» не только к единому времени, но и месту BASE, т.е. к вмещающим породам. Это позволяет совместно использовать полученные Z-модели для сравнения особенностей глубинного строения на исследуемой территории относительно базового пункта наблюдения. Обычно для этого

рассматриваются отношения амплитудно-частотных характеристик в полевых пунктах к характеристике базового пункта наблюдения. В нашем случае это отношение $\frac{ZM_{pole}}{M_{Zbase}}$, которое можно преобразовать с использованием формулы (1):

$$\frac{ZM_{pole}}{M_{Zbase}} = \frac{SN_{base}}{SN_{pole}}. \quad (2)$$

То есть получилось, что отношение $\frac{ZM_{pole}}{M_{Zbase}}$ эквивалентно отношению СН базового и полевого пунктов, но при этом спектр Накамуры базового пункта находится в числителе, т.е. для коррекции Z составляющих МФ в полевых точках достаточно использовать их спектр Накамуры (SN_{pole}), что существенно проще.

Используя результаты, полученные в работе [8], в которой рассматривается интрузивный массив базит-гипербазитового состава в районе села Русская Журавка (Хопёрский мегаблок ВКМ), залегающим на глубинах 100–300 м в песчано-сланцевой толще воронцовской серии, можно предположить, что диапазон частот 5.5–5.9 Гц соответствует переходу «Осадочный чехол – Докембрийский фундамент». Тогда для получения информации о степени различий пород, расположенных в кровле докембрийского фундамента, нормируем графики отношений на их среднее значение в этом диапазоне частот. Нормировка «приводит» отношения в соответствие с предположением о том, что однотипному строению полевых пунктов на одной глубине должны соответствовать одинаковые значения. Используя полученные нормированные отношения СН для всех полевых точек, рассмотрим их в диапазоне частот 2–5.5 Гц, в котором мог бы отражаться интрузивный массив. Из всех полученных нормированных отношений выберем те, которые в диапазоне частот 2–5.5 Гц группируются у максимальных и минимальных значений (рис. 3а).

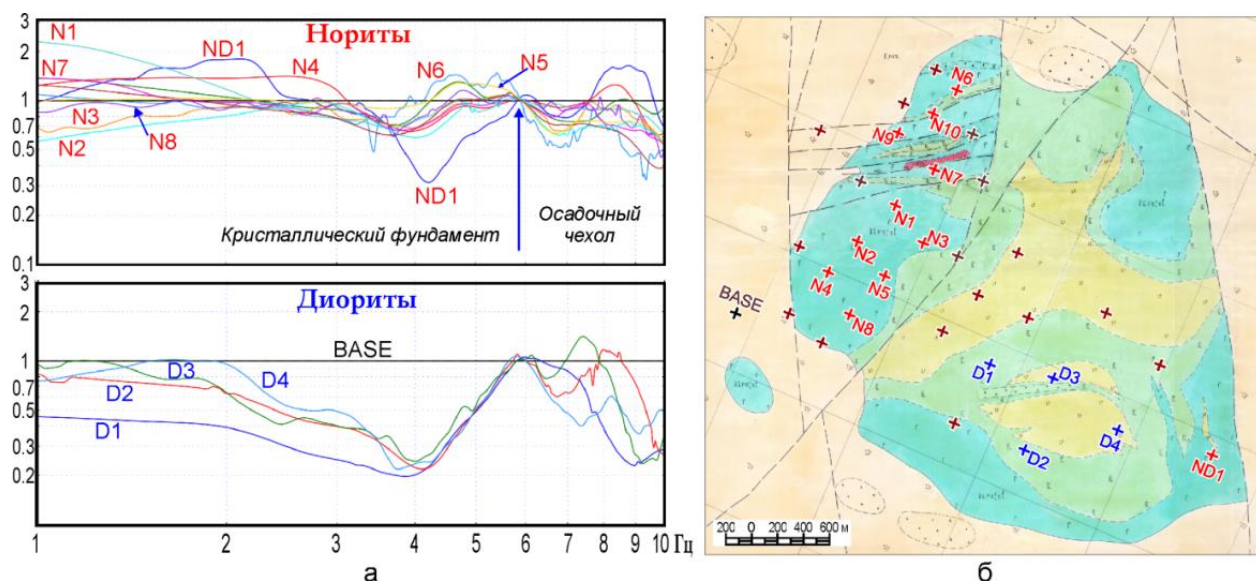


Рис. 3. Максимальные и минимальные нормированные отношения СН (а), и пространственная локализация соответствующих им полевых пунктов (б)

Как видно из рис. 3а, на частоте 4 Гц значения отношений в «максимальной» группе в 2.5 раза отличаются от «минимальных». Такое существенное отличие не может быть обусловлено воздействием на геологическую среду техногенной нагрузки, которая после коррекции спектром Накамуры не превышала 30%. На рис. 3б показана локализация полевых пунктов соответствующих минимальным и максимальным нормированным отношениям, показанным на рис. 3а. Как видно из рис. 3б, пункты наблюдения с максимальными значениями отношения группируются в норитах еланского комплекса (N), а минимальные группируются в зоне преобладания диоритов мамонского комплекса (D).

При более детальном изучении формы отношений можно заметить несколько особенностей, имеющих интересную геологическую интерпретацию. Так, для пункта наблюдения ND1 значения отношения в диапазоне $4\text{--}5.5 \text{ Гц}$ совпадают с нижней границей, а в диапазоне частот $2\text{--}3.5 \text{ Гц}$ – с верхней. Это можно интерпретировать как присутствие в кровле фундамента массива диоритов, находящегося в норитах. На рис. 3 б видно, что рядом с пунктом наблюдения ND1 расположено диоритовое тело. На частотах ниже 2 Гц значения отношений для большинства полевых пунктов стремятся к «1», т.е. к вмещающим породам, кроме отдельных пунктов. Так, пункт D1,

расположенный в диоритах, имеет «минимальные» значения отношения, а пункт N1, расположенный в норитах – «максимальные». Это можно интерпретировать, как присутствие в этих пунктах «подводящих каналов». Для пунктов наблюдения N2 и N3, расположенных практически в центре еланского комплекса, значения отношений в рассматриваемом диапазоне частот расположены ниже «1», что можно интерпретировать как «присутствие» подводящих каналов диоритового массива.

Таким образом, в результате исследования подтверждено предположение о том, что в пунктах наблюдения с близким геологическим строением модели МФ не имеют сильных отличий. Уверенное разделение норитов и диоритов, имеющих близкие петрофизические характеристики, свидетельствует о наличии тесной связи амплитудно-частотного состава микросейсмического фона с геологическим строением и, возможно, с петрографическими свойствами пород в пункте наблюдения. Представленный в работе способ можно использовать для зонирования на разных глубинных горизонтах не только многофазные интрузии, но и породы кровли докембрийского фундамента платформенной территории, перекрытых осадочным чехлом. Полученные в работе результаты открывают новые возможности использования спектра Накамуры, расширяющие границы применения пассивных методов сейсморазведки.

Список литературы

1. Беклемишев А.Б. Научно-методические и экспериментальные основы технологии изучения пассивных сейсмических явлений: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ВНИИГеосистем, 2006. – 40 с.
2. Горбатилов А.В. Способ сейсморазведки / Патент RU 2271554 С1, опубл. 10.03.2006. – М.: Роспатент, 2006.
3. Любушин А.А. Анализ микросейсмического шума дал возможность оценить магнитуду, время и место сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 г. // Наука и технологические разработки. – 2011. – № 1. – С. 3–12.
4. Чеботарёва И.Я. Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях, методы и экспериментальные результаты: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М.: ИПНГ РАН, 2011. – 350 с.

5. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. – 1989. – V 30, N 1. – P. 25–33.

6. Фоновое сейсмическое поле как новый элемент в структуре геофизических экологических функций литосферы // Инновационное развитие науки: фундаментальные и прикладные проблемы : Монография / [Аламанова Э. А. и др.] / И. Н. Сафронич. – Петрозаводск : МЦНП «Новая наука», 2022. – Разд. I. – Гл. VI. – с. 201–236. DOI: 10.46916/30092022-3-978-5-00174-701-7.

7. Сафронич И.Н., Красилов С.А., Колесников И.М., Колесникова С.И. Анализ данных в частотной области с использованием процессора обработки сигналов программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 394–403.

8. Дубянский В.И., Силкин К.Ю. Отображение гипербазитовой интрузии в частотно-спектральном поле микросейсм на примере Русско-Журавского участка, юго-востока Воронежского кристаллического массива // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2007. – № 1. – С. 146–150.

© И.Н. Сафронич, 2022