

## Изучение ошибки измерений в методе микросейсмического зондирования

А. С. Нумалов,\* Д. А. Преснов, Р. А. Жостков

Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Россия, 123242 Москва, Б. Грузинская ул., д. 10 стр. 1

(Статья поступила 20.10.2020; подписана в печать 22.10.2020)

Приведены результаты натурных экспериментальных работ по микросейсмическому зондированию Быстрынской площади Минусинской впадины с использованием автономных приёмников. Обработаны полевые материалы, построен глубинный разрез по методу микросейсмического зондирования. Изучена зависимость ошибки метода от числа длины записи. Описана процедура расчета зависимости этой статистической ошибки. Впервые проверена модификация автоматической отбраковки данных микросейсмического зондирования. Разработан и описан алгоритм, улучшающий качество обработанных данных. Проведено сравнение результатов, получаемых по старому и новому алгоритмам. Объяснены различия итоговых разрезов. Проведено сравнение и оценка распределения статистической ошибки на разрезе по обоим алгоритмам. Оценена перспективность метода для поиска месторождений газа. Предложена методика, значительно ускоряющая проведение полевых работ.

PACS: 91.32.De

УДК: 550.834.8

Ключевые слова: микросейсмическое зондирование, пассивная сейсморазведка, Минусинская котловина, статистическая ошибка.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы всё большую популярность набирают пассивные сейсмические технологии изучения глубинного строения Земли в различных масштабах — от единиц метров, до сотен километров. Пассивные методы, основанные на анализе низкочастотного фонового шума, обладают рядом преимуществ перед классической сейсморазведкой, к основным, из которых относятся экологическая безопасность и экономическая эффективность. Наиболее развитые в настоящее время методы базируются на анализе кинематических [1] или динамических [2] параметров поверхности волн рэлеевского типа [3], которые могут быть определены в результате анализа микросейсмического шума.

В рамках настоящей работы были проведены опытные экспериментальные геофизические исследования на достаточно изученном сейсморазведкой и бурением объекте в Красноярском крае с целью верификации различных пассивных сейсмических методов. В результате эксперимента с использованием современных автономных сейсмических станций были выполнены профильные измерения шумового фона в течение продолжительного времени.

Путём сопоставления сейсмических данных, полученных в ходе ранее проводившихся работ [4], информации с пробуренных разведочных скважин и данных, полученных методом микросейсмического зондирования, оценивается перспективность новой технологии в разведочной геофизике.

### 1. ОПИСАНИЕ ПОЛИГОНА И ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования выполнялись на Быстрынской площади Минусинской впадины Красноярского края, расположенной неподалёку от деревни Быстрая и города Минусинска (рис. 1). Территория достаточно хорошо изучена, имеется, по меньшей мере, двенадцать скважин. В одной из законсервированных разведочных скважин наблюдается выход газа, сопряжённый с процессом горения. В разные годы проводились геофизические исследования: гравиразведочные, магниторазведочные и сейсморазведочные.

В результате геофизических исследований и бурения были обнаружены сильнопарафиновая нефть, а также в больших объёмах газ, однако по экономическим соображениям добыча налажена не была. Один из последних геологических отчетов по изучению региона относится к 80-ым годам [5].

Современные исследования выполнялись специалистами ООО «Эвенкиягеофизика», входящего в холдинг «ГЕОТЕК Сейсморазведка». в 2018 году с использованием оригинальных импульсных вибраторов производился отстрел сейсморазведочного профиля длиной примерно 3 км, с шагом между пунктами приёма 25 м.

Задачей настоящей работы было выполнить продолжительные измерения фонового сейсмического шума на указанном профиле (рис. 1) с целью сопоставления результатов различных пассивных методов с данными, полученными классической сейсморазведкой. Работы выполнялись с 21.08.2019 по 25.08.2019.

Профиль проходил по межгорной низине, пересечённой сетью оврагов. В качестве измерительно-оборудования использовались 7 автономных широкополосных сейсмических станций нового поколения [6] и одна опорная станция (регистратор RefTek и трехкомпонентный молекулярно-электронный

\*E-mail: nartems@bk.ru

велосиметр типа СМЕ-4211), которые вкапывались на глубину около 40 см.

За день до проведения работ выполнялась сверка всех измерительных приборов на территории завода невзрывных источников «Эвенкиягеофизика» в г. Минусинск. Проектный профиль включал 21 измерительный пункт, с шагом между приёмниками 150 м. Накопление шумового сигнала в точке измерения производилось более 24 часов. На время проведения работ на горе у середины профиля был разбит полевой лагерь, дающий полный обзор над изучаемой территорией с высоты.

Профиль брал начало в низинном поле, пересекал незначительный овраг, и завершался у подножья горы, поэтому можно считать, что вдоль исследуемого профиля рельеф местности практически плоский, поэтому нет необходимости учитывать влияние криволинейной границы на поверхностные волны [7, 8]. Необходимо отметить, что каждый день периодически шёл дождь (один из которых продлился целые сутки).

## 2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе исследования выполнена обработка экспериментальных данных по методу микросейсмического зондирования [9]. Метод является статистическим и основан на том, что неоднородности верхних слоев земной коры искажают спектр микросейсмического поля.

На поверхности Земли над высокоскоростными неоднородностями амплитуды микросейсм в некоторой части спектра уменьшаются, а над низкоскоростными неоднородностями — возрастают, объяснить этот эффект можно сохранением потока энергии при распространении поверхностной волны [10]. В ходе модельных экспериментов было выявлено, что глубина залегания неоднородностей составляет примерно половину длины волны, на которой происходит искажение спектра.

В ходе операции обработки ММЗ продолжительная запись вертикальной компоненты сейсмического шума на пикетах профиля и на отстоящей в стороне от профиля базе разделяется на интервалы определённой величины. Затем определяется спектр этих сигналов на каждом из интервалов. Спектры интервалов записи на профильных пикетах делятся на спектры соответствующих интервалов базы, после чего полученные отношения усредняются по количеству интервалов.

Чтобы определить какое число интервалов необходимо (и соответственно, какая требуется минимальная длина записи) была изучена зависимость среднего отклонения отношений спектров на каждом интервале от осреднённого значения отношения спектров для различного числа интервалов.

Сначала выбирались данные с одного из пикетов и базы, после чего вся запись разбивалась на пятиминутные интервалы, спектр каждого интервала на пике-

те делился на спектр соответствующего интервала на базе. Затем выбирались требуемые частоты из отношения спектров. Выбранные с нескольких пикетов для нескольких частот отношения амплитуд, полученных из отношений спектров для интервалов, в дальнейшем проходили обработку в цикле.

Цикл начинался с двух интервалов, начиная отсчёт с начала синхронизированной записи на пикете и базе. После этого рассчитывалось среднее значение отношения амплитуд выбранных частот, отклонения от среднего значения отсеивались по правилу трёх сигм. Отфильтрованные данные использовались в формуле (1):

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - S_{\text{ср.}})^2}{N(N-1)}}, \quad (1)$$

где  $\delta$  — величина ошибки,  $N$  — число интервалов,  $S_i$  — отношение амплитуд выбранной частоты на выбранном интервале,  $S_{\text{ср.}}$  — среднее отношение амплитуд выбранной частоты по выбранным интервалам. После этого находилась относительная ошибка — путём деления величины ошибки на среднее и пересчёта отношения в процента.

С каждым новым шагом цикла в расчёт добавлялся следующий по времени интервал, и операция повторялась вплоть до достижения всей длины записи. Строились графики выбранных частот для выбранных пикетов. Итоги расчётов отображены на следующих графиках (рис. 2):

На рисунке отображены графики зависимости ошибки от длины записи для данных с двух разных пикетов, запись на которых велась в разные дни, для трёх различных частот (0.03 Гц, 0.06 Гц, 0.1 Гц). По графикам можно сделать вывод, что для достижения уровня ошибки 5%, достаточно вести запись около 9 часов.

Кроме того, видно, что уровень ошибки быстрее снижается у более высоких и медленнее — у более низких. Соответственно, длина записи в настоящий момент ограничена временем достижения уровня ошибки, составляющего менее 5% для низких частот, поскольку они его достигают дольше, чем высокие.

Для дальнейшего совершенствования метода и сокращения длины записи на одном пикете, более целесообразно использовать не один фиксированный интервал для всех частот, а сделать величину интервала зависимой от частоты. Например, сделать его равным определённому числу периодов.

Помимо классического метода обработки [11] использовался модифицированный подход, заключающейся в автоматическом подборе временного интервала и отбраковки данных. Вместо фиксированного временного интервала длительностью 5 мин (стандарт для микросейсмического зондирования) для каждой частоты использовался свой интервал равный десяти периодам, что достаточно для определения спектральной компоненты.

Отбраковка данных производилась путем сравнения ошибки определения значения спектральной компонен-

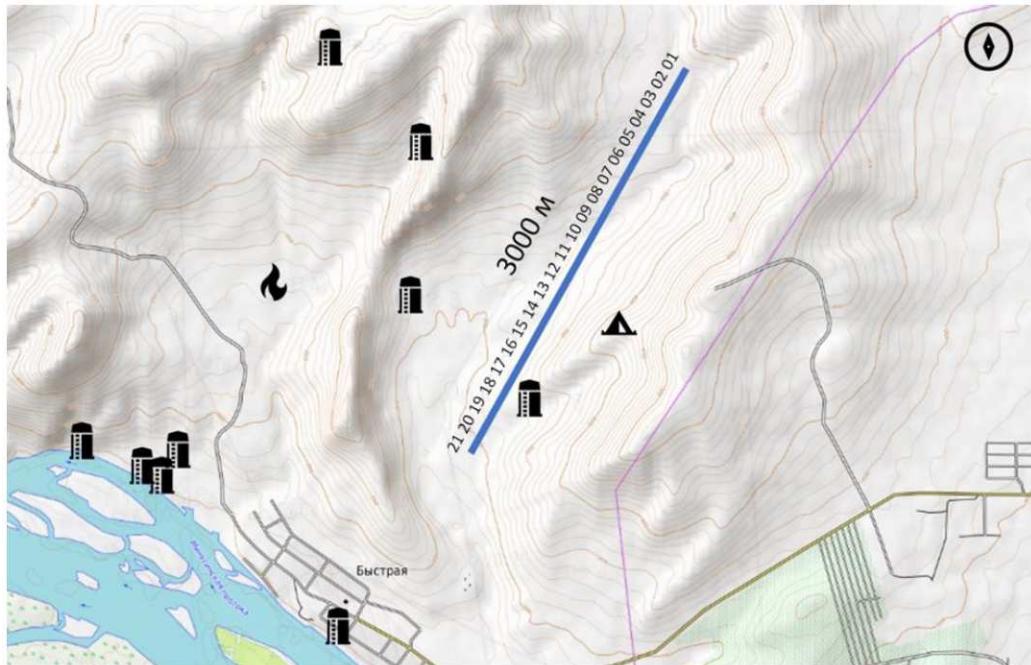


Рис. 1: Профиль микросейсмических измерений на Быстрянском геофизическом полигоне

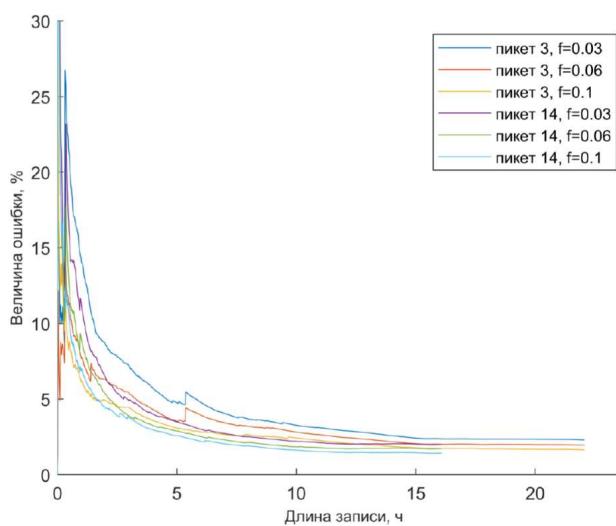


Рис. 2: Зависимость величины ошибки от времени записи

ты, рассчитанной по каждому отдельному временному интервалу, с величиной стандартного отклонения усредненного значения спектральной компоненты по всем оставшимся интервалам, т.е. отбрасывались значения, существенно отличающиеся от среднего.

Примечательно, что в классическом методе отбраковываются не отдельные значения спектральных компонент, а целиком спектры отдельных временных интервалов. Таким образом, реализуется более полное использование экспериментальных данных и численно оценивается ошибка результатов, что ранее не про-

водилось. В будущем будет разработан строгий алгоритм выбора длительности временного интервала в зависимости от условий стационарности и эргодичности сигнала.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для построения глубинного разреза используется дисперсионная кривая скорости поверхности волн. Полученные отношения амплитуд спектров приемников и опорной станции привязываются к глубине, соответствующей длине волны, после чего строится разрез.

На рис. 3 (слева) представлен глубинный разрез, полученный по результатам работ по старому алгоритму, с фиксированным интервалом для всех частот, равным пяти минутам. На разрезе цветовая шкала отображает относительную интенсивность микросейсмических сигналов в децибелах.

Породам с более высокими скоростями сейсмических волн, соответствуют зоны пониженных относительных интенсивностей (холодные тона), а осадочным породам с низкими скоростями сейсмических волн — зоны повышенных относительных интенсивностей (тёплые тона).

Преобладание тёплых тонов на пикетах с 15 по 21 на глубине примерно 1000–1400 м скорее всего связано с упомянутым ранее затяжным дождём, который с разной степенью интенсивности встречается на большей части записи.

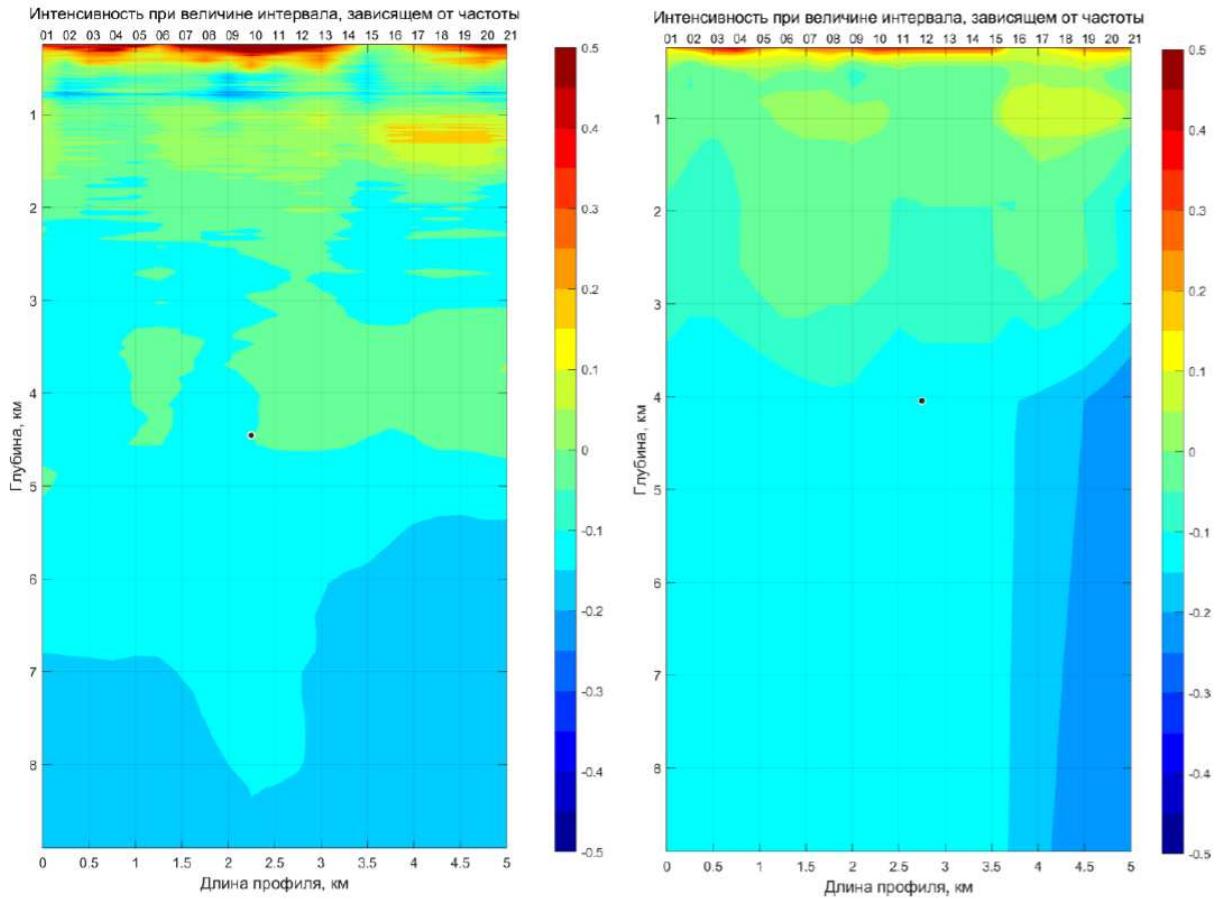


Рис. 3: Профиль микросейсмического зондирования, построенный по классической методике (слева) и с использованием модифицированного подхода (справа)

Верхняя часть разреза сложена в основном песчано-глинистыми породами верхнего девона с относительно низкими скоростями по сравнению с нижележащими структурами, среди которых, по-видимому, аргиллиты с более высокими скоростями сейсмических волн.

В целом же, на разрезе невозможно различить каких-либо вертикальных аномалий, а повышенная интенсивность приповерхностного слоя по вышеуказанной причине может быть проинтерпретирована как мягкие осадочные породы, поскольку базовый пункт приёма располагался на склоне горы, а профиль проходил через межгорную впадину, верхняя часть разреза которой, очевидно, заполнена мягкими осадочными породами.

Справа на рис. 3 представлен глубинный разрез, полученный по новому алгоритму, с величиной интервалов, по которым идёт осреднение, различной для каждой частоты и равной 10 периодам.

Может показаться, что профиль, построенный по классической методике, содержит более детальную информацию о строении среды. Однако, если мы обратимся к рассчитанному значению статистической ошибки (что не делалось в предыдущих исследовани-

ях [11, 12, 13]), то станет очевидным, что классическая обработка обладает слишком большой погрешностью и доверять ей, строго говоря, нельзя (что можно наблюдать на рис. 4).

Напротив, использование автоматического подбора длительности временного интервала, по которому происходит усреднение, и отбраковки данных приводит к значительному повышению точности получаемых результатов. На рисунке видно, что в среднем уровень ошибки падает в 2 раза, а во многих местах — до 4 раз.

По имеющимся данным бурения и по итоговой сейсмической схеме по сейсморазведочным работам видно, что на изучаемом профиле среда является однородно-слоистой, без вертикальных неоднородностей.

Кроме того, на рис. 3 на разрезе показана величина относительной интенсивности микросейсмических сигналов, выраженная в децибелах — по этой причине можно сказать, что незначительные цветовые различия на равной глубине являются незначительными и с точки зрения характеристик среды.

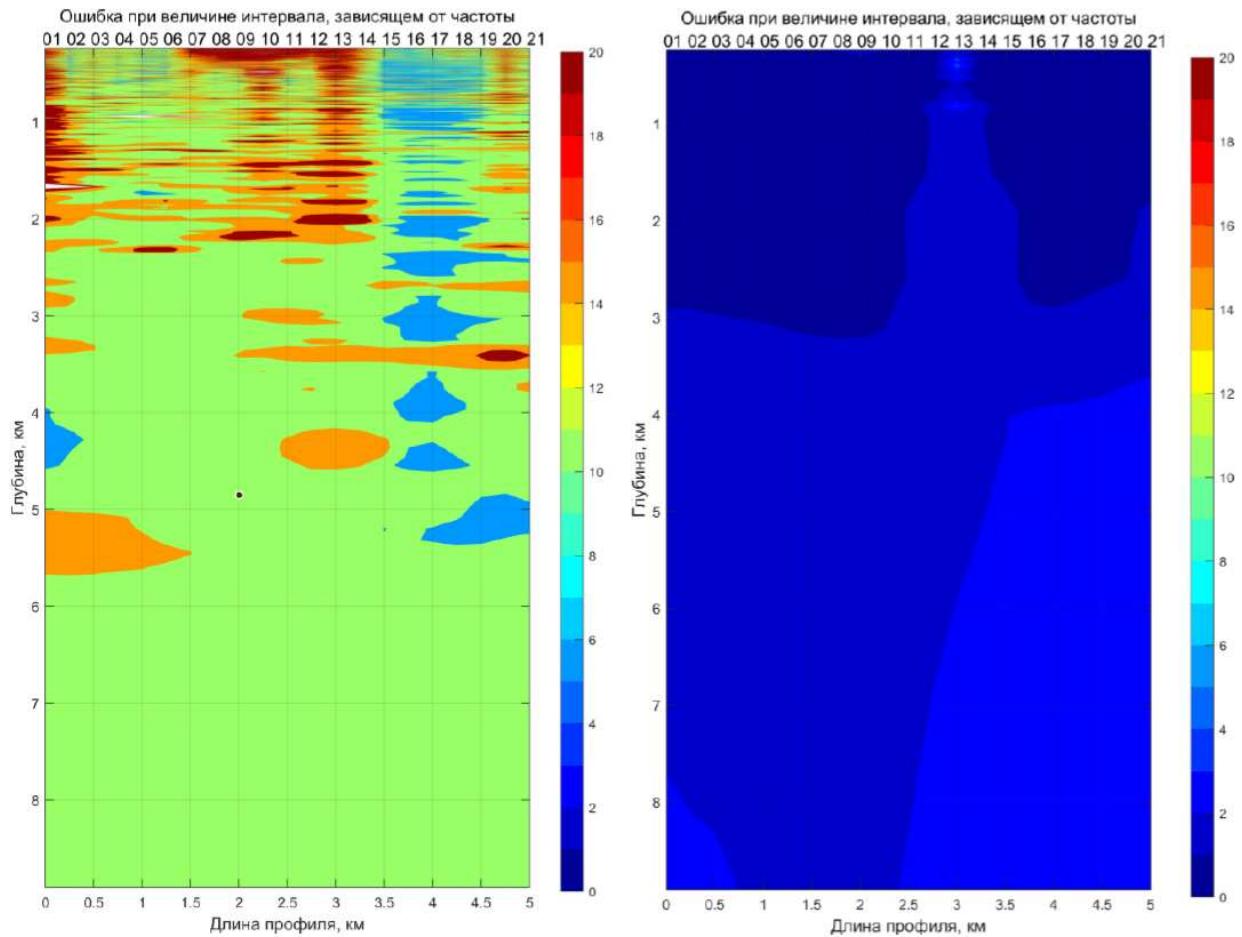


Рис. 4: Статистическая ошибка микросейсмического зондирования, построенная для профиля по классической методике (слева) и с использованием модифицированного подхода (справа)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку метод микросейсмического зондирования направлен как раз на поиск аномалий вертикальных неоднородностей, отсутствие таковых на полученных разрезах подтверждает корректную работу метода.

Пока что данный метод представляется непригодным для поиска месторождений газа, подобных тому, что находится на месте проведения работ, поскольку слабо различает слоистую среду, а сами месторождения газа, как правило — субгоризонтальные, в то время как метод заточен на субвертикальные неоднородности.

Дальнейшее развитие метода путём сокращения

длины записи и понижения уровня ошибки при использовании нефиксированных интервалов индивидуально для каждой частоты позволит улучшить данные, упростить и ускорить проведение работ.

## Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка» и лично Копылову М. А., Цымбалу С. Г., Деткову В. А. за оказанное гостеприимство, и полезные обсуждения, а также Горбенко В. И. за помощь в организации полевых работ.

Работа выполнена при поддержке финансовой грантов РФФИ (проекты № 18-05-70034).

- 
- [1] Chmiel M., Mordret A., Bouy P., Brenguier F., Lecocq T., Courbis R., Hollis D., Campman X., Romijn R., Van der Veen W. // Geophys. J. Int. 2019. **218**, N 3. P. 1781.
  - [2] Горбатиков А. В., Степанова М. Ю., Цуканов А. А., Тинакин О. В., Комаров А. Ю., Одинцов С. Л. // Неф-
  - тяное хозяйство. 2010. № 6. С. 15.
  - [3] Жостков Р. А., Преснов Д. А., Шуруп А. С., Собисевич А. Л. // Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. 2016. № 5. 165406.
  - [4] Salinas V., Ugalde A., Kamayestan Ah., Jokar M., Gharibvand M. M., Villasenor A., Heidari G. // Geophys-

- ical Prospecting. 2019. **67**. Р. 1652.
- [5] Псарев П. В., Андронова Г. И., Миллер-Носова М. Ф. Отчет о проведении опытно-методических работ МОГТ в пределах Быстрянского и Тагарского полигонов. Минусинск, «Енисейгеофизика», 1986. Росгеолфонд. 424996.
- [6] Собисевич А. Л., Преснов Д. А., Агафонов В. М., Собисевич Л. Е. // Наука и технологические разработки. 2018. **97**, № 1. С. 25.
- [7] Жостков Р. А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018(а). **82**, № 11. С. 1555.
- [8] Жостков Р. А. // Акустический журнал. 2019. **65**, № 5. С. 708.
- [9] Горбатиков А. В. Пат. РФ № 2271554. Бюллетень изобретений. 2006. № 7.
- [10] Жостков Р. А., Преснов Д. А., Собисевич А. Л. // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2015. **2**, № 26. – С. 11.
- [11] Лиходеев Д. В., Дударов З. И., Жостков Р. А., Преснов Д. А., Долов С. М., Данилов К. Б. // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 28.
- [12] Собисевич А. Л., Тверитинова Т. Ю., Лиходеев Д. В., Белобородов Д. Е., Дударов З. И., Долов С. М., Преснов Д. А., Пузич И. Н. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. **42**, № 2. С. 73.
- [13] Преснов Д. А., Жостков Р. А., Лиходеев Д. В., Белобородов Д. Е., Дударов З. И., Долов С. М. // Вулканология и сейсмология. 2020. № 3. С. 34.

## Studying the measurement error in the microseismic sounding method

A. S. Numalov<sup>a</sup>, D. A. Presnov, R. A. Zhostkov

The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Moscow 123242, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>nartems@bk.ru

The results of field experimental work on microseismic sounding of the Bystryanskaya area of the Minusinsk depression using autonomous receivers are presented. Field materials were processed, a deep section was built using the method of microseismic sounding. The resulting section was interpreted. The dependence of the method error on the record length number was studied. The procedure for calculating the dependence of this statistical error is described. For the first time, a modification of the automatic rejection of microseismic sounding data was tested. An algorithm has been developed and described that improves the quality of the processed data. Comparison of the results obtained by the old and new algorithms is carried out. The differences in the final sections are explained. Comparison and estimation of the distribution of the statistical error on the section by both algorithms is carried out. The prospect of the method for the search for gas deposits is estimated. A technique is proposed that significantly speeds up field work.

PACS: 91.32.De

Keywords: microseismic sensing, passive seismic, Minusinsk hollow, statistical error.

Received 20 October 2020.

### Сведения об авторах

1. Нумалов Артем Сергеевич — науч. сотрудник; e-mail: nartems@bk.ru.
2. Преснов Дмитрий Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: presnov@physics.msu.ru.
3. Жостков Руслан Александрович — канд. физ.-мат. наук; e-mail: shageraxcom@yandex.ru.