АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 65, № 5, с. 708–720

АКУСТИКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 550.344.563

ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СРЕДЫ ПРИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ ВДОЛЬ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2019 г. Р. А. Жостков*

Федеральное государственное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, ул. Б. Грузинская 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

**e-mail: shageraxcom@yandex.ru*

Поступила в редакцию 14.11.2018 г.
После доработки 16.04.2019 г.
Принята к публикации 07.05.2019 г.

Представлены результаты численного двумерного моделирования распространения рэлеевской волны вдоль криволинейной границы твердой идеальной среды, содержащей контрастное включение. Показано, что игнорирование влияния как выпуклого, так и вогнутого рельефа при интерпретации данных микросейсмического зондирования может приводить к ошибкам для широкого диапазона выраженности рельефа и контраста между включением и вмещающей среды, а использование дополнительной поправки при обработке данных позволяет учесть или даже исключить эти ошибки во всем рассмотренном диапазоне указанных параметров.

Ключевые слова: микросейсмическое зондирование, поверхностные волны, криволинейная граница, неоднородная среда, численное моделирование, Comsol Multiphysics

DOI: 10.1134/S0320791919050204

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в практике геофизических исследований земных недр широко используются как амплитудные, так и дисперсионные методы сейсморазведки, основанные на анализе рэлеевских волн. Из сравнения этих методов [1] следует, что наименее требовательным к качеству и количеству измерительной аппаратуры, а также наиболее быстрым и простым при проведении полевых работ и при анализе получаемых данных является метод микросейсмического зондирования (ММЗ) [2]. Его суть заключается в определении пространственного распределения относительной интенсивности микросейсмического фона (естественных колебаний земной поверхности): повышенные значения соответствуют мягким включениям и наоборот. Этот эффект можно объяснить тем, что при прохождении волны вблизи контрастного включения ее скорость изменяется, что влечет изменение ее амплитуды в соответствии с принципом сохранения потока энергии [3]. Поскольку рэлеевские волны локализованы в приповерхностном слое мощностью около одной длины волны, то для зондирования разных глубин достаточно использовать волны разных частот.

Этот метод успешно применяется при исследовании реальных геофизических объектов [4–12] и получает развитие [3, 13–15], однако остаются вопросы, связанные с точностью, особенностями применения, а также тонкостями проведения полевых работ и обработки получаемых данных. В том числе до сих пор не уделено должного внимания вопросам учета рельефа, несмотря на то, что он существенен у большинства объектов, изучаемых с помощью ММЗ. Настоящая работа содержит новые результаты исследования искажений, вызываемых рельефом при микросейсмическом зондировании, и способов их уменьшения.

Впервые проблема распространения поверхностных волн вдоль криволинейных границ твердого тела была затронута в 1927 г. [16, 17]. В этих работах рассчитана зависимость скорости волны Рэлея от радиуса цилиндрической поверхности, вдоль которой распространяется поверхностная волна. Эти результаты были экспериментально подтверждены в [18]. Первые асимптотические выражения для скорости рэлеевской волны, распространяющейся вдоль цилиндрической поверхности, выведены в [19]. Помимо аналитических результатов Викторов И.А. получил экспериментальные данные о затухании поверхностной волны на вогнутой цилиндрической поверхности, связанном с излучением объемных волн в твердую среду, и отсутствии такого затухания на выпуклой поверхности [20]. Подобные эксперименты проводились также и для сферических образцов [21]. Первые

же теоретические исследования поверхностных волн на сферической поверхности проведены в [22].

Впервые аналитическое рассмотрение распространения рэлеевских волн вдоль бесконечной шероховатой поверхности было выполнено Бреховских Л.М. в [23], а первые экспериментальные результаты для такой поверхности приведены в [24]. Позднее распространение поверхностных волн вдоль границы с малыми по сравнению с длиной волны дефектами рассматривались многими авторами. Например, теоретически рассеяние поверхностной волны на малом одиночном препятствии рассмотрено в [25–27]. В [28] исследовано преобразование рэлеевских волн в объемные и обратно как на локальных дефектах, образованных малыми пазами или выступами, так и на гребенках, состоящих из таких дефектов, не рассматриваемых в рамках настоящей работы. Рассеяние поверхностной волны при наклонном падении на одиночный двумерный малый дефект в дальней зоне рассмотрено в [29, 30], а на трехмерный – в работе [31], причем в ней опровергаются некоторые результаты, полученные ранее [32]. Экспериментальная работа [33] является одной из первых, учитывающих конечный размер неоднородности поверхности не цилиндрической или сферической формы. В более ранних работах [34–36] рассмотрены трещины конечной длины, но пренебрежимо малой шириной.

Упомянутые выше исследования в основном рассматривают случай, когда длина волны значительно превосходит размер неровности поверхности. Также существует большое количество научных работ, в которых используется приближение геометрической акустики [37–40]. Наиболее общие и математически строгие результаты были впервые получены в [41, 42].

Распространению волн Рэлея на гладких поверхностях произвольной формы посвящена работа Крылова В.В. [43], а также [44], в которой используется подход, предложенный в [45]. В [46] приведено аналитическое решение для высокочастотной рэлеевской волны, распространяющейся вдоль поверхности твердого тела, характеризующейся двумя радиусами кривизны в перпендикулярных плоскостях.

Помимо волн Рэлея во многих работах исследованы другие типы волн, распространяющихся вдоль криволинейной границы. Большой интерес для геофизики представляют задачи о распространении волн типа Стоунли. Так, например, в [47] рассмотрена плоская задача о рассеянии поверхностной волны, распространяющейся вдоль шероховатой границы жидкого и твердого полупространств, в том числе и для границы вода-лед, а в [48] – для крупных неровностей поверхности. Классическая задача о поверхностной волне вдоль вогнутой цилиндрической поверхности получила развитие в работе [49], в которой вакуум заменен на жидкость. Наиболее полное объединение результатов теоретических исследований распространения поверхностных волн в неоднородных твердых телах, включая процессы рассеяния, отражения и преобразования волн локальными и периодическими неоднородностями различного типа, в том числе и при распространении вдоль поверхностей переменной кривизны, приведено в [50].

Таким образом, несмотря на большое количество исследований особенностей распространения поверхностных волн вдоль криволинейных границ, нет универсальных решений, которые могут применяться в геофизических задачах в широком частотном диапазоне для сложных форм рельефа (например, при переменном радиусе кривизны, сопоставимом с длиной волны). Существующие решения не могут удовлетворить потребности геофизики в совершенствовании как дисперсионных, так и амплитудных методов пассивного мониторинга, основанных на использовании поверхностных волн, поскольку известные решения получены в приближениях, слабо применимых для реальных геофизических задач, а именно: рассматриваются либо малые дефекты поверхности (шероховатые границы), либо приближение геометрической акустики, либо особенности рассеяния в дальней зоне (когда не учитывается влияние объемных волн), либо простые формы (сфера, цилиндр), которые слабо подходят для аппроксимации геофизических объектов.

Поэтому полученные в рамках настоящей работы новые научные результаты могут быть использованы для решения существующих геофизических задач.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Двумерное численное моделирование во временной области проведено методом конечных элементов с помощью специально разработанного программного обеспечения [51], созданного в пакете COMSOL Multiphysics 5.4 (лицензия № 9600341) с подключенными модулями “Акустика” и “Структурная механика”.

В рамках линейной теории упругости с использованием уравнения движения Ламэ и закона Гука [52] смоделировано распространение плоской волны Рэлея вдоль криволинейной границы идеального неоднородного твердого полупространства и вакуума, описываемой формулой

$$y = 2K\sigma \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right),$$

где x, y – горизонтальная и вертикальная координаты; σ и $2K\sigma$ – характерные горизонтальный и вертикальный размеры рельефа. Подбирая раз-

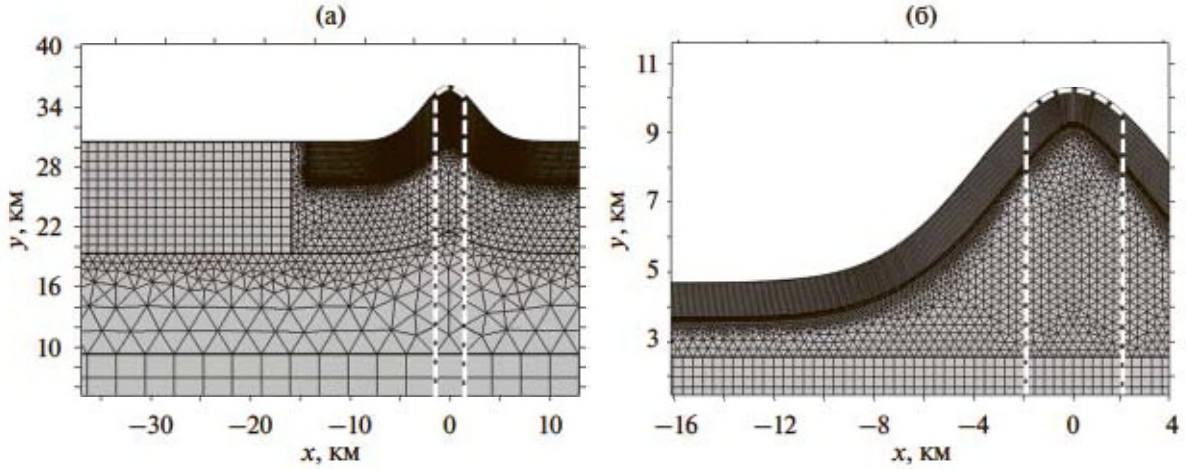

Рис. 1. Сравнение сеток конечных элементов для разных отношений характерного размера особенности рельефа к длине падающей волны при $K = 1$: (а) – $N = 3$; (б) – $N = 0.3$. Положение контрастного включения отмечено пунктиром.

личные значения σ и K возможно аппроксимировать форму многих объектов, как выпуклых (горы, вулканы), так и вогнутых (овраги, долины).

Материалом полупространства выбран гранит со следующими характеристиками: плотность $\rho_0 = 2600$ кг/м^3, модуль Юнга $E_0 = 60$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_0 = 0.25$ [53]. При этих параметрах скорости продольной, поперечной и рэлеевской волн соответственно равны 5262, 3038 и 2793 м/с.

Вертикальное контрастное включение (рис. 1) представляло собой область шириной σ, расположенную симметрично вдоль оси $x = 0$ и отличающуюся от вмещающей среды модулем Юнга $E_{\text{вкл}}$, измененного в C раз: $E_{\text{вкл}} = CE_0$ (равенство коэффициента C единице соответствует однородной среде). Для удобства в настоящем исследовании все результаты получены для фиксированного значения характерного размера σ, выбранного равным длине рэлеевской волны на частоте 1 Гц, т.е. 2793 м. Ключевым параметром настоящего исследования является величина $N = \sigma/\lambda$, характеризующая отношение характерного размера рельефа σ к длине зондирующей волны λ. Такая нормировка пространственных величин позволяет делать выводы для случаев подобной геометрии по данным исследования для единственного значения σ. Параметр N оказывает существенное влияние на построение сетки. Дело в том, что размер конечных элементов должен быть много меньше как σ, так и λ. В случае длинных волн особо мелкий пространственный шаг необходим только в области с особенностью рельефа (размер элементов Δx в приповерхностном слое не превышал $\sigma/12 \approx 230$ м, а вдали от особенности рельефа $\lambda/10 \approx 3360$ м при $N = 0.083$), а для коротких волн – во всем приповерхностном слое ($\Delta x < \lambda/10 \approx 24$ м при $N = 12.057$). Использование такого же мелкого шага во всей модели не приводит к существенному повышению точности, однако требования к вычислительной мощности значительно возрастают. Поэтому применялось построение разных типов сеток в различных областях модели (рис. 1), позволяющее автоматически подбирать оптимальную сетку конечных элементов для разных параметров модели с сохранением высокой точности без излишней нагрузки на рабочую станцию.

Шаг по времени Δt определялся критерием Куранта–Фридрихса–Леви с запасом прочности, равным двум [54] ($\Delta t \approx 14$ мс при $N = 0.083$ и $\Delta t \approx 1.2$ мс при $N = 12.057$).

Граничные условия выбраны следующим образом: свободная верхняя криволинейная граница; правая и нижняя границы модели – слабоотражающие, почти полностью поглощающие падающее на них излучение; левая – источник плоского импульса поверхностной волны продолжительностью 8 периодов, представляющего собой аналитическое решение для волны Рэлея, модулированное окном Ханнинга [54] – так моделируется реальный цуг микросейсмического шума. На границе включения и вмещающей среды заданы условия непрерывности смещения и напряжений.

Целью численного моделирования было получение синтетических сейсмограмм с двухсот виртуальных датчиков, эквидистантно расположенных на дневной поверхности вблизи особенности рельефа (расстояние между датчиками 0.05σ). Для этого было проведено множество реализаций для разных параметров C, N и K. Для автоматического анализа получаемых сейсмограмм в среде Wolfram Mathematica 11 разработаны специальные алгоритмы [55], реализующие обработку дан-

Рис. 2. Излучатель и приемник поверхностных волн, подключенные к измерительной ультразвуковой установке Ritec advanced measurement system RAM-5000 на одном из образцов.

ных в соответствии с методом микросейсмического зондирования [2].

Верификация численной модели осуществлена двумя способами. Первый заключался в определении скорости волны Рэлея при моделировании ее распространения вдоль плоской границы идеальной однородной среды. Этот способ показал, что ошибка получаемых данных составляет менее 0.5%.

Для второго способа применялось физическое моделирование (рис. 2) с использованием дюралюминиевых образцов, поверхностям которых с помощью электроэрозионной резки была придана криволинейная форма в виде гауссоиды. Для уменьшения паразитных отражений акустических сигналов от границ образцов на остальные поверхности был нанесен скульптурный пластилин, а перед этим все поверхности были отшлифованы и отполированы. Доступ к лабораторному оборудованию и помощь в проведении эксперимента были любезно предоставлены профессором кафедры акустики физического факультета МГУ им. М.Ю. Ломоносова А.И. Коробовым и его коллегами [56, 57].

Задача эксперимента состояла в определении временной задержки между импульсами поверхностных волн, образованных при расщеплении одного цуга волны Рэлея при прохождении через выпуклый рельеф. Механизм этого эффекта [58] заключается в том, что часть энергии падающей поверхностной волны распространяется вдоль криволинейной границы, а часть рассеивается в виде объемной волны [20] и после прохождения особенности рельефа преобразуется обратно в поверхностную волну, при этом обгоняя сигнал, распространяющийся вдоль поверхности. Для коротких волн преобладает распространение энергии вдоль криволинейной поверхности, а для длинных – внутри среды в виде объемной волны. Параметры образцов ($K = 1$, $N = 1.6$) с помощью предварительного численного моделирования были подобраны таким образом, чтобы после прохождения особенности рельефа амплитуда расщепленных поверхностных волн была соизмерима, что облегчило их выделение на экспериментальных записях.

Сравнение результатов численного и физического моделирования показало, что, как и ожидалось, для случая выпуклого рельефа эффект расщепления проявляется, а для вогнутого – нет. Причем, задержка для исследуемого образца между расщепленными поверхностными волнами по результатам эксперимента составляет 1.16 мкс, а по данным моделирования – 1.17 мкс при полном времени, необходимом волне Рэлея для прохождения особенности рельефа, около 4 мкс. Таким образом, можно сделать вывод, что созданная численная модель достаточно точно воспроизводит исследуемые эффекты и данным расчетов можно доверять.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА НА РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Ранее было показано [58, 59], что рельеф может сильно искажать результаты микросейсмического зондирования – при рассмотрении обработанных синтетических сейсмограмм для однородной среды, обладающей рельефом, на двумерном графике (рис. 3) выделяются ложные аномалии относительной интенсивности микросейсмического шума, отличающиеся от среднего значения на 30–50%. На рис. 3 и далее расстояние вдоль горизонтальной оси x нормировано на фиксированный параметр $\sigma = 2793$ м. По вертикальной оси на рис. 3–6 отложен десятичный логарифм отношения σ к длине зондирующей волны – при увеличении этого параметра длина волны уменьшается и наоборот. Такой выбор обусловлен наглядностью, поскольку в случае линейного масштаба наиболее интересная часть графика оказалась бы сжата в узкую полосу. Эти изображения получены с помощью объединения 48 профилей относительной интенсивности, определяемых сечением вдоль горизонтальной оси при фиксированной длине волны λ.

Рассчитанные относительные интенсивности микросейсмического шума в зависимости от горизонтальной координаты и длины зондирующей волны для однородной среды (рис. 3) могут использоваться в качестве поправки на рельеф при проведении микросейсмического зондирования, причем для каждой выраженности рельефа K стоит использовать собственные поправки.

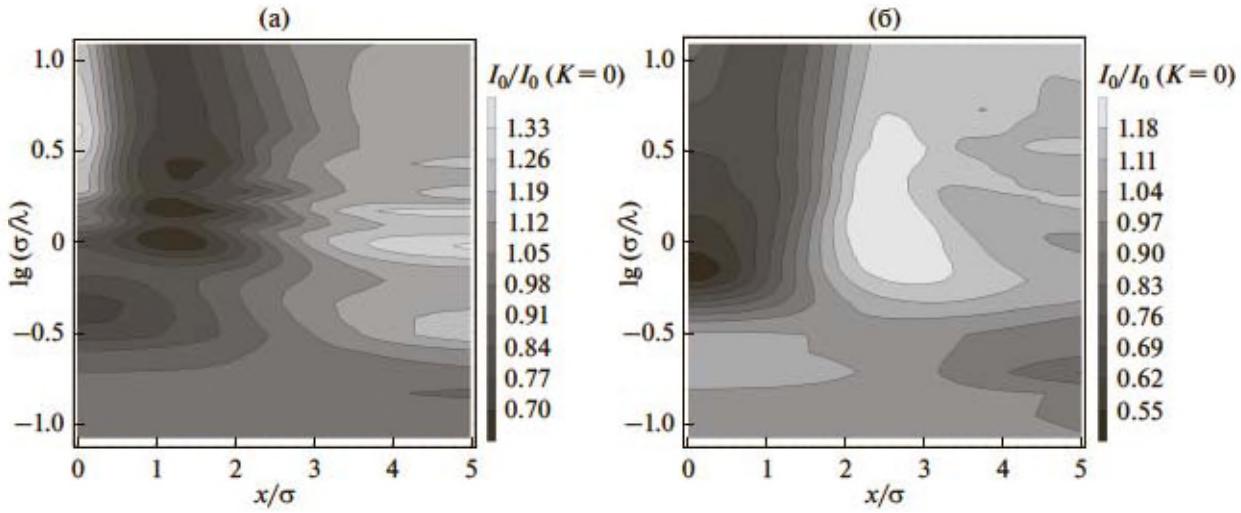

Рис. 3. Распределение отношения интенсивности I_0 микросейсмического шума к аналогичной величине при отсутствии рельефа для однородной среды ($K = 0$): (а) – выпуклый рельеф ($K = 1$); (б) – вогнутый рельеф ($K = -1$).

Результаты обработки синтетических сейсмограмм в соответствии с ММЗ при локализации контрастного включения представлены на рис. 4 в виде зависимости интенсивности микросейсмического шума I, нормированной на аналогичную величину для однородной среды I_0. Практическая ценность подобных изображений (рис. 4 и 6) заключается в том, что при преобразовании вертикальной координаты можно перейти от длины волны к глубине, исходя из соотношения $y = k(C)\lambda$, где $k(C)$ – коэффициент глубинной привязки, строго говоря, зависящий от контраста между включением и вмещающей средой [14], но обычно принимаемый равным 0.5. Таким образом, с помощью анализа распределения относительной интенсивности микросейсмического шума в зависимости от горизонтальной координаты и величины $k(C)\lambda$ возможно определять глубинное строение неоднородной среды при микросейсмическом зондировании с помощью замены переменной $\lambda = y/k(C)$ в вертикальной координате на рис. 4–6.

Поясним полученные результаты. На рис. 4а и 4б приведены примеры локализации контрастного включения в случае плоской границы $K = 0$. Наглядно продемонстрировано, что ММЗ позволяет правильно определить тип включения (на рис. 4а наблюдается повышенное значение относительной интенсивности микросейсмического шума, что свидетельствует о наличии мягкого включения, и наоборот на рис. 4б) и оценить его форму, если горизонтальный размер не превосходит длину зондирующей волны (подробнее о разрешающей способности этого метода см. в [12]).

Обработка в соответствии с оригинальной методикой, игнорирующей рельеф, но при его наличии (рис. 4в и 4г) может приводить к принципиальным ошибкам [58, 59]: неверное определение формы включения (истинная форма включения не зависит от вертикальной координаты, но восстановленное включение имеет округлую форму и заглублено, вместо того, чтобы иметь вытянутую форму и выходить на поверхность с сохранением отличия от вмещающей среды (рис. 4а и 4д), поскольку контраст при приближении к поверхности уменьшается (рис. 4в и 4д)); неверное определение типа включения (на рис. 4г вместо твердой неоднородности диагностируется мягкое); появление крупных сильно контрастных ложных включений; завышенное значение контрастов. Можно заключить, что часто вне зависимости от геологического строения при микросейсмическом зондировании гор, вулканов и других объектов с сильно выраженным выпуклым рельефом будет диагностироваться твердое включение с мягкой центральной частью в силу влияния одного лишь рельефа (рис. 3а и 4в). При вогнутом рельефе также будет определяться ложное твердое включение (рис. 3б и 4г).

Использование специальной поправки, представляющей собой дополнительную нормировку на данные о рассеянии волны Рэлея на особенности рельефа в случае однородной среды (рис. 3), позволяет значительно (мы намеренно не вводим критерий оценки степени повышения точности, поскольку сам метод микросейсмического зондирования является качественным, а не количественным) уменьшить эти ошибки во всей области применимости оригинального метода (рис. 4д и 4е), т.е. приблизить получаемый геофизический профиль (рис. 4д и 4е) при наличии рельефа к случаю, когда его нет (рис. 4а и 4б) – именно ре-

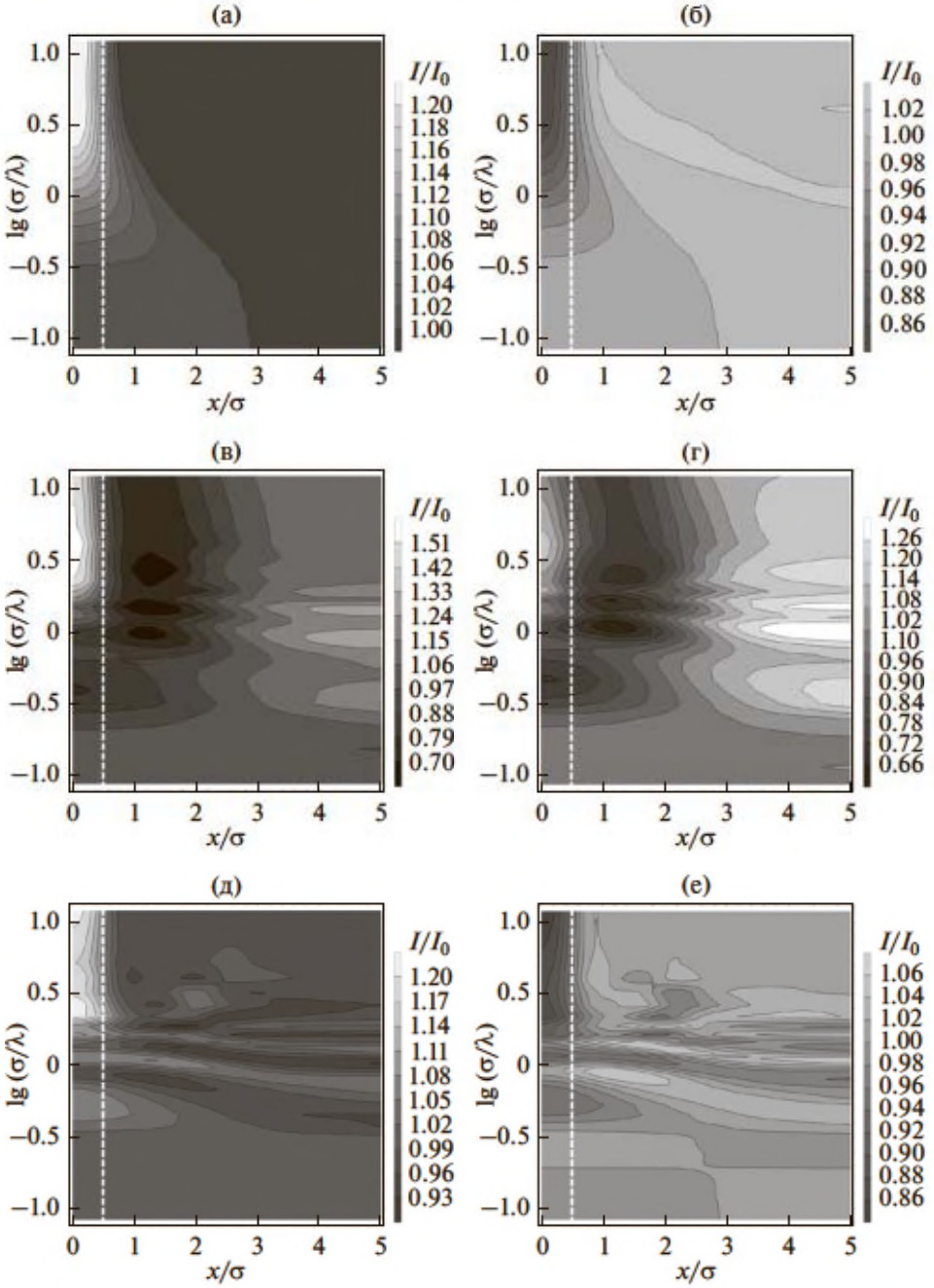

Рис. 4. Распределение относительной интенсивности микросейсмического шума при наличии локального включения, граница которого отмечена пунктиром: (а) – $C = 0.8$, $K = 0$; (б) – $C = 1.2$, $K = 0$; (в) – $C = 0.8$, $K = 1$, без поправки; (г) – $C = 1.2$, $K = 1$, без поправки; (д) – $C = 0.8$, $K = 1$, с поправкой; (е) – $C = 1.2$, $K = 1$, с поправкой.

зультат при отсутствии рельефа здесь и далее мы будем считать максимально точным.

Поясним смысл этой процедуры. В оригинальном методе микросейсмического зондирования [2] при выполнении полевых работ используются сейсмометры, размещаемые на пунктах наблюдения вдоль исследуемого профиля (или территории при площадной съемке), и опорная сейсмостанция, располагаемая в фиксированном месте и работающая на протяжении всего времени полевых измерений. Необходимость использования опорной станции вызвана тем, что ММЗ позволяет проводить измерения с помощью ограниченного числа датчиков (зачастую гораздо меньшего, чем количество пунктов наблюдения), перемещаемых между пунктами наблюдения, а для сопоставления данных, полученных в разное время (и соответственно при разной микросей-

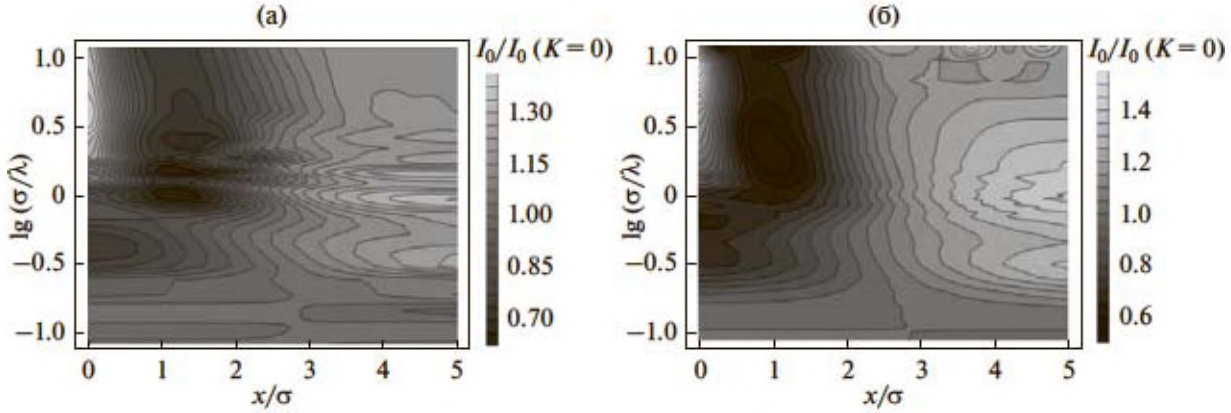

Рис. 5. Распределение отношения интенсивности I_0 микросейсмического шума к аналогичной величине при отсутствии рельефа для однородной среды при $K = 1$: (а) – двумерный случай; (б) – трехмерный случай.

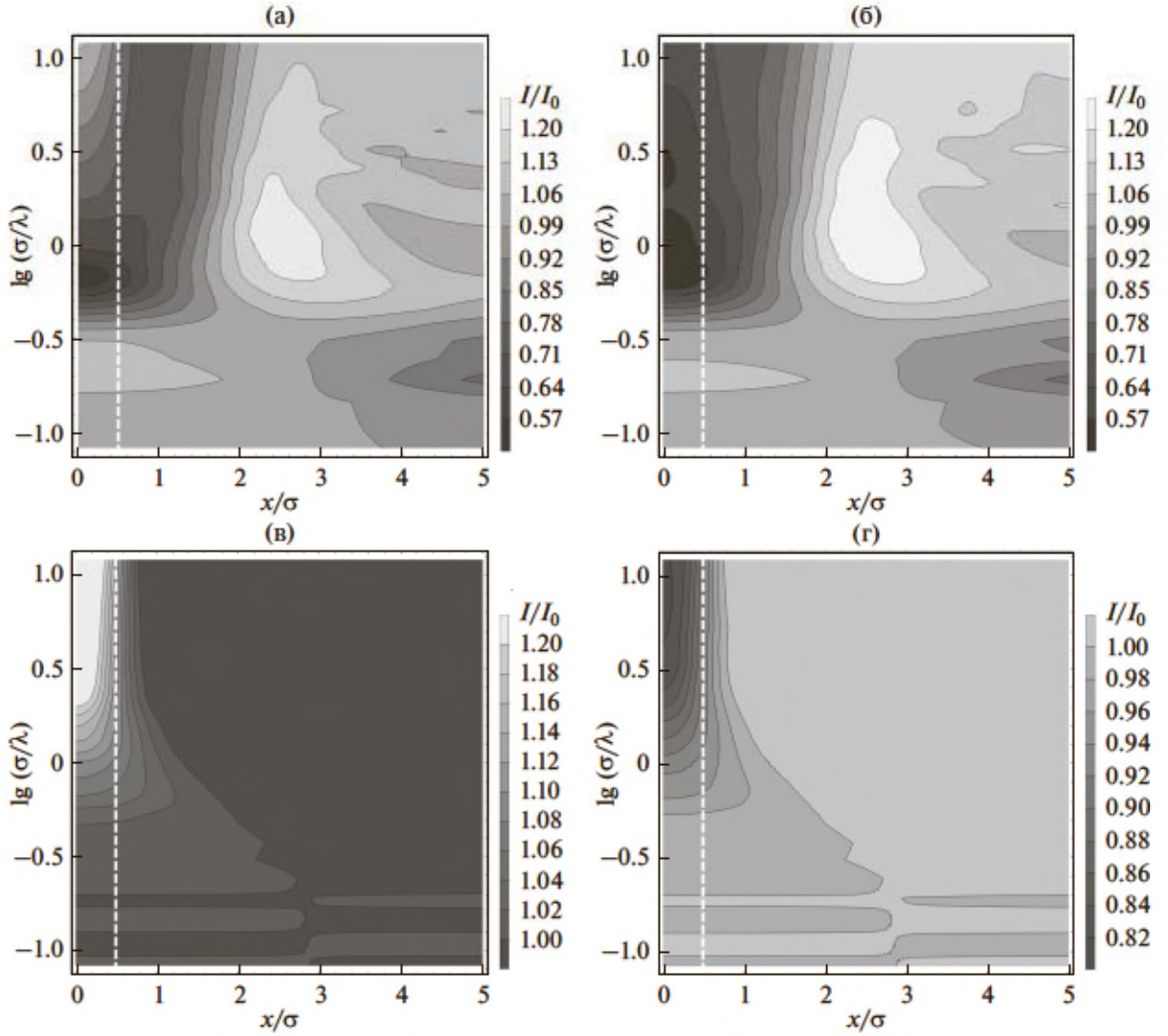

Рис. 6. Распределение относительной интенсивности микросейсмического шума при наличии локального включения, граница которого отмечена пунктиром: (а) – $C = 0.8$, $K = -1$, без поправки; (б) – $C = 1.2$, $K = -1$, без поправки; (в) – $C = 0.8$, $K = -1$, с поправкой; (г) – $C = 1.2$, $K = -1$, с поправкой.

смической обстановке) требуется учесть временные вариации микросейсмического поля с помощью нормирования измеряемых фоновых интенсивностей на данные опорной станции. В случае проведения измерений в пунктах с разными условиями (не обусловленными геологическим строением, изучение которого является целью ММЗ), например, при неоднородном рельефе местности, получаемые результаты могут содержать ошибки (рис. 3), поскольку на фоновую интенсивность могут оказывать влияние многие факторы, а при интерпретации получаемых данных считается, что все эффекты связаны с геологическим строением.

Использование поправки на рельеф осуществляется в несколько шагов. Во-первых, рассчитывается поле относительной интенсивности микросейсмического шума на модели однородной среды с рельефом, соответствующим реальному на исследуемой территории. К сожалению, это само по себе является сложной задачей, требовательной к вычислительным ресурсам, поэтому предполагается аппроксимирование реального рельефа гауссоидами (в большинстве случаев одной, поскольку для более точной аппроксимации рельефа требуются гауссоиды со значительно меньшим характерным размером, а значит, они не оказывают существенного влияние на поле микросейсм; таким образом, достаточно подобрать пару значений K и σ, которые будут характеризовать аппроксимирующую гауссоиду). В силу симметрии рельефа при таком приближении удается обойтись гораздо меньшими вычислительными мощностями и более простым программным обеспечением [51]. В результате такого расчета получается распределение относительной интенсивности (например, рис. 3). Далее проводится дополнительная нормировка на данные о рассеянии волны Рэлея на особенности рельефа в случае однородной среды сразу после нормировки на данные опорной станции. Это позволяет при обработке сигналов сохранить учет временных вариаций микросейсмического шума и учесть влияние разных условий установки датчиков на пунктах наблюдения, вызванные рельефом. Отметим, что подобным методом можно учесть и другие возможные различия в условиях на пунктах наблюдения (например, когда часть из них находится под водой), для чего необходимо провести расчет соответствующей поправки. Тем не менее, в силу нелинейной природы рассеяния волн в такой среде устранить все ложные неоднородности не удается. Однако влияние этих ошибок удается уменьшить, если перейти от двумерной задачи к трехмерной (соответствующей большинству реальных объектов геофизических исследований), что подтверждается как нашими исследованиями (рис. 5), так и в работах других авторов [14]. В этом случае при рассеянии интерферируют не плоские волны, а плоская падающая и цилиндрическая рассеянная, затухающая при удалении от оси симметрии. Это приводит к менее выраженному влиянию интерференции, что проявляется в более плавном характере изолиний в центральной части рисунка в трехмерном случае (рис. 5б). Отметим, что решение трехмерной задачи требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому в условиях ограниченности возможностей было необходимо уменьшить точность при рассмотрении коротких волн, что привело к ошибкам, заметным в верхней части рис. 5б.

В настоящей работе впервые приводятся результаты корректировки микросейсмического зондирования вдоль вогнутого рельефа. На рис. 6 приведено сравнение результатов обработки в соответствии с оригинальной методикой (рис. 6а и 6б) и при использовании поправки на рельеф (рис. 6в и 6г).

Для вогнутого рельефа наблюдаются по сути те же принципиальные ошибки, вызванные его влиянием (рис. 3б). При этом поправка позволяет почти полностью их устранить, приблизившись к результату для плоской границы (рис. 4а и 4б). Такое значительное улучшение результатов объясняется отчасти тем, что рассеянная в объем на особенности рельефа энергия поверхностной волны излучается в нижнюю часть полупространства, не оказывая заметного влияния на поле на его поверхности в отличие от случая выпуклого рельефа.

Поправка на рельеф носит физический, а не геометрический характер, что подтверждается тем, что простым учетом формы рельефа при использовании, например, не вертикальной компоненты смещения (скорости или ускорения) микросейсмического шума, а нормальной к поверхности не удается достичь более точных результатов, чем те, которые обеспечивает описанная методика [60].

При обсуждении полученных результатов на различных научных мероприятиях неоднократно ставился вопрос о том, насколько выраженным должен быть рельеф, чтобы оказывать серьезное влияние на микросейсмическое зондирование, поскольку приведенные выше результаты относятся к случаю $K = 1$, что практически никогда не наблюдается для реальных геофизических объектов (типичные значения K лежат в диапазоне 0–0.5). Кроме того, вызывает интерес эффективность поправки на рельеф при небольших значениях K. Ответу на эти вопросы частично посвящена настоящая работа.

Результаты исследования возможности диагностирования мягкого и твердого локальных включений в случае выпуклого рельефа различной степени выраженности (характеризуемой параметром K) при $N = 2$ представлены на рис. 7

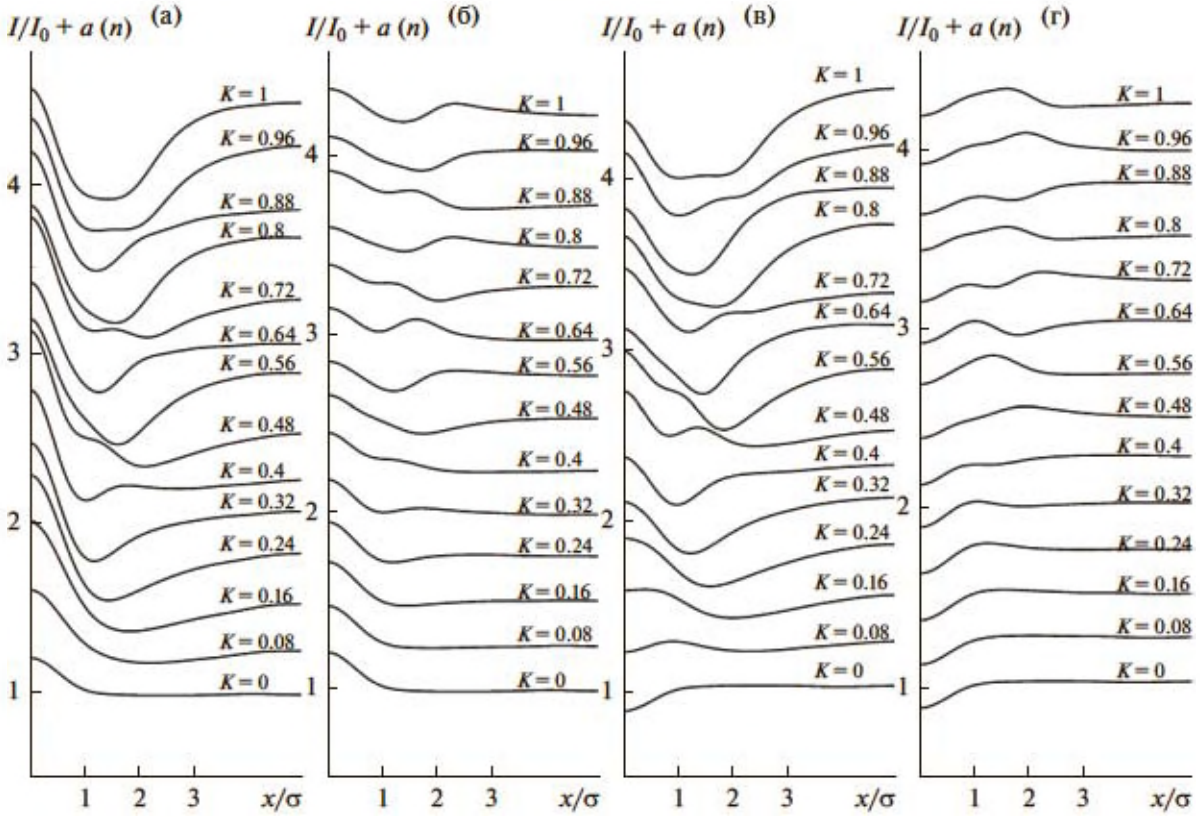

Рис. 7. Семейства зависимостей относительной интенсивности микросейсмического шума от расстояния вдоль профиля при $N = 2$ и выпуклом рельефе для различных K: (а) – $C = 0.8$, без поправки; (б) – $C = 0.8$, с поправкой; (в) – $C = 1.2$, без поправки; (г) – $C = 1.2$, с поправкой.

(здесь и далее исключительно для удобства восприятия построенные кривые разнесены вдоль оси ординат на величину $a = 0.25(n - 1)$, где n – номер кривой, начиная с $K = 0$ на рис. 7–9 или с $C = 0.5$ на рис. 10).

Сравнение профилей на рис. 7а и рис. 7в со случаем при $K = 0$ (который на рис. 7–10 соответствует отсутствию рельефа и считается максимально точным) показывает, что даже при небольшой выраженности рельефа ($K = 0.08$) он приводит к появлению ошибок в интерпретации данных, а уже при $K = 0.16$ они становятся значительными. При этом учет поправки на рельеф (рис. 7б и 7г) приводит к почти полному исключению этих ошибок в диапазоне K от 0 до 0.4, т.е. практически во всех случаях, соответствующих реальным геофизическим объектам. При больших же значениях K получаемый результат в целом правильный (что особенно четко видно, если сравнивать со случаем без учета поправки), но содержит неточности, о которых говорилось ранее. При уменьшении длины зондирующей волны диапазон выраженности рельефа, в котором поправка обеспечивает почти полное отсутствие ошибок, расширяется, например, при $N = 6$ (рис. 8) какие-либо заметные ошибки при использовании поправки отсутствуют в отличие от результатов применения оригинального метода микросейсмического зондирования.

Влияние вогнутого рельефа (рис. 9) слабее и приводит к появлению значимых ошибок только при $K > 0.16$–0.32, поэтому при исследовании оврагов, долин или других объектов с пологими склонами допустимо не использовать поправку на рельеф. Тем не менее, в результате ее применения практически полностью исключаются ошибки при всех рассмотренных значениях параметров K, N и C, что значительно повышает точность интерпретации получаемых результатов.

Если информация о рельефе является априорной, то данные о контрасте между включением и вмещающей средой неизвестны и, строго говоря, являются одной из целей проведения геофизической разведки. Поэтому было рассмотрено влияние величины этого контраста C при фиксированной выраженности рельефа K (рис. 10). Поскольку при моделировании включение имело ширину σ (а в реальных случаях эта величина редко превышает 2σ в областях, при исследовании которых рельеф играет существенную роль), то повышение относительной интенсивности в интервале горизонтальной координаты 1–3, интер-

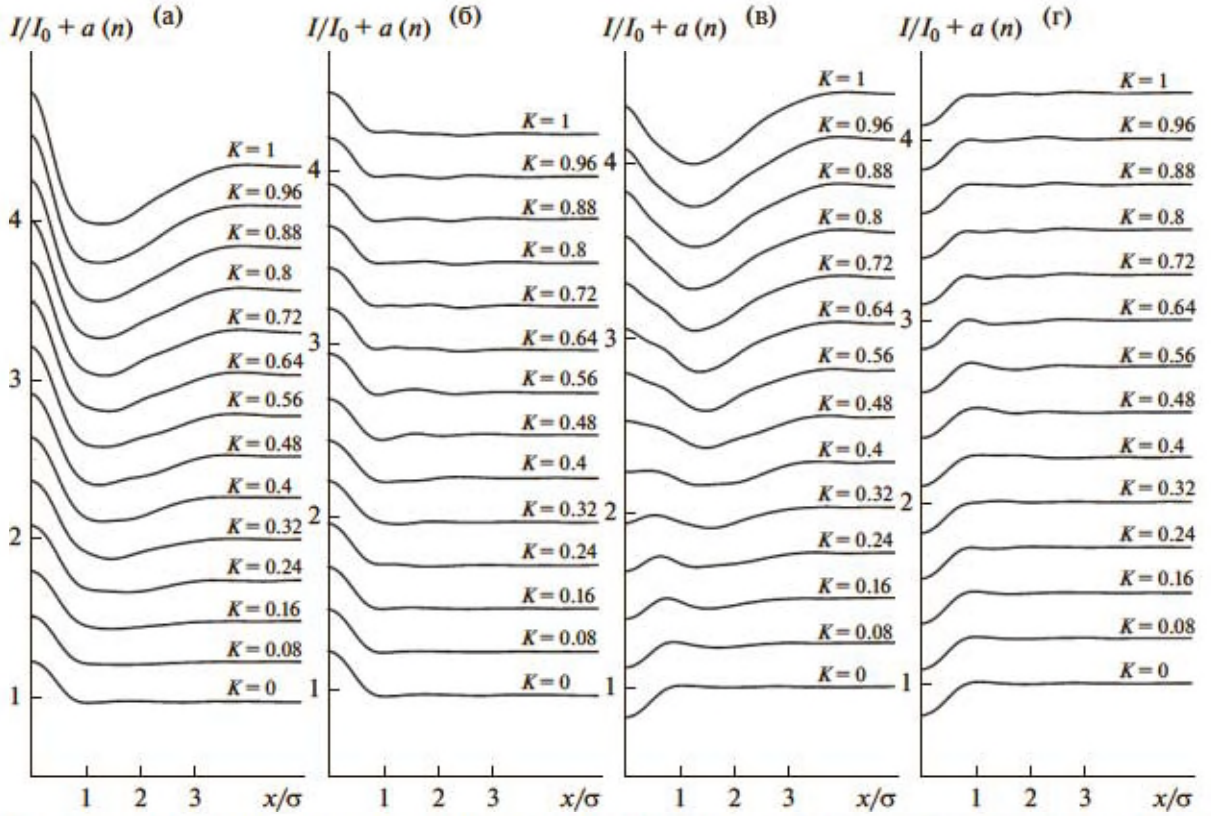

Рис. 8. Семейства зависимостей относительной интенсивности микросейсмического шума от расстояния вдоль профиля при $N = 6$ и выпуклом рельефе для различных K: (а) – $C = 0.8$, без поправки; (б) – $C = 0.8$, с поправкой; (в) – $C = 1.2$, без поправки; (г) – $C = 1.2$, с поправкой.

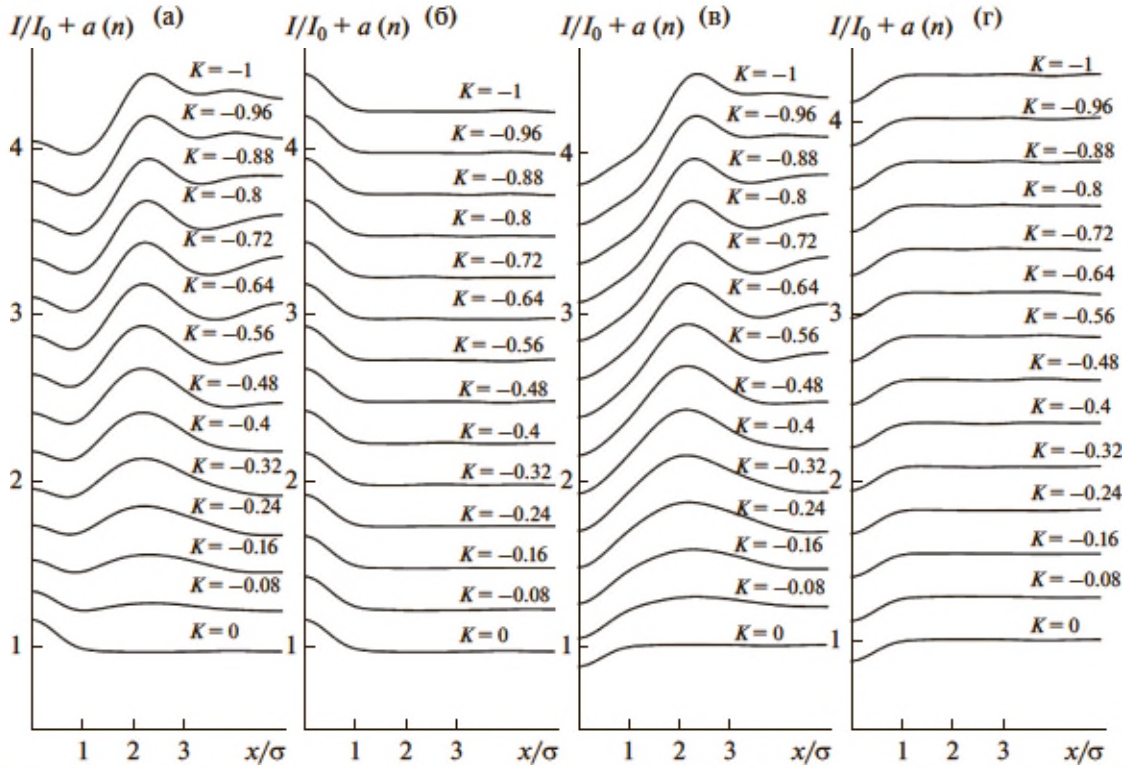

Рис. 9. Семейства зависимостей относительной интенсивности микросейсмического шума от расстояния вдоль профиля при $N = 2$ и вогнутом рельефе для различных K: (а) – $C = 0.8$, без поправки; (б) – $C = 0.8$, с поправкой; (в) – $C = 1.2$, без поправки; (г) – $C = 1.2$, с поправкой.

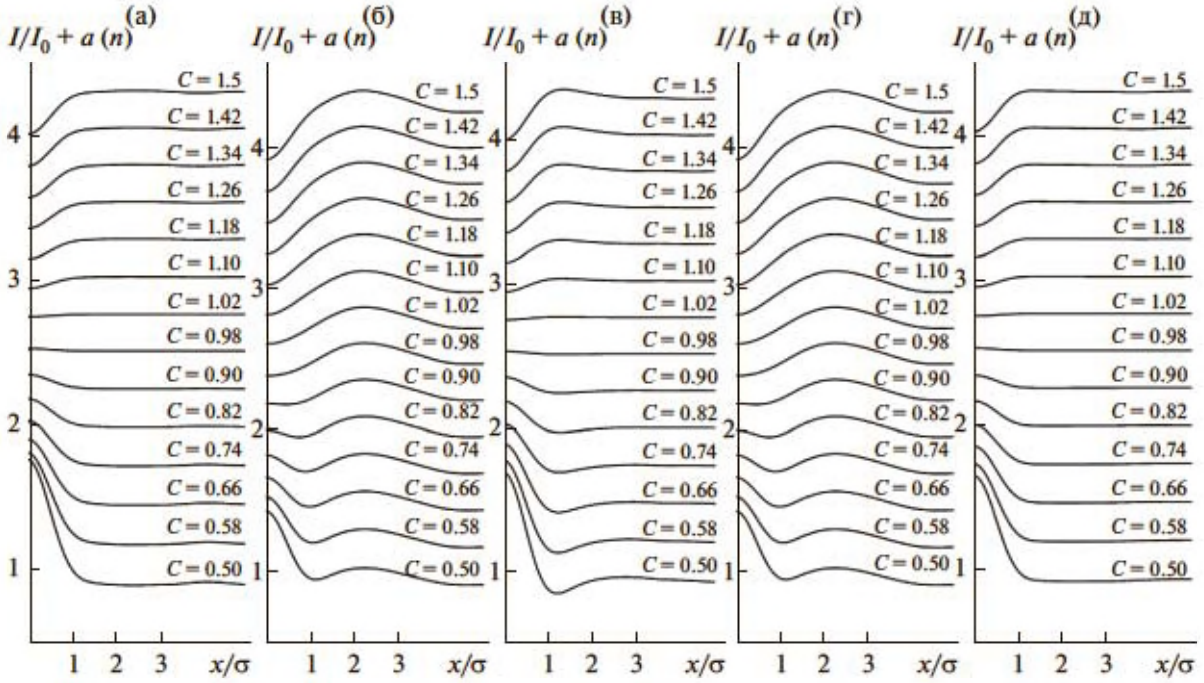

Рис. 10. Семейства зависимостей относительной интенсивности микросейсмического шума от расстояния вдоль профиля при $N = 2$ при разных C: (а) – $K = 0$; (б) – $K = 0.2$, без поправки; (в) – $K = 0.2$, с поправкой (г) – $K = -0.2$, без поправки; (д) – $K = -0.2$, с поправкой.

претируемое как ложное мягкое включение и вызываемое рельефом, проявились при всех рассмотренных контрастах (рис. 10б и 10г). Учет поправки на рельеф приводит к заметному повышению точности как в случае выпуклого (рис. 10в), так и вогнутого (рис. 10д) рельефа.

Рис. 10б и 10в показывают, что при выпуклом рельефе абсолютное значение ошибки, вызываемой неровностью поверхности, пропорционально величине контраста C. Поэтому необходимо иметь в виду, что в случае диагностирования при микросейсмическом зондировании локальных включений, сильно контрастирующих с вмещающей средой, реальные параметры этих неоднородностей и окружающей их среды могут значительно отличаться от наблюдаемых даже в случае применения поправки на рельеф. Подобное наблюдается и при вогнутом рельефе, однако в этом случае применение поправки на рельеф почти полностью устраняет ошибки в широком диапазоне контрастов C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе с помощью верифицированной численной модели методом конечных элементов исследованы особенности распространения поверхностных волн вдоль криволинейной границы твердого полупространства, содержащего протяженное вертикальное включение, отличающееся значением модуля Юнга от вмещающей среды. В качестве модели рельефа выбрана гауссоида (1), которой возможно аппроксимировать большинство реальных объектов. Анализ синтетических сейсмограмм в соответствии с методом микросейсмического зондирования подтвердил возможность возникновения значительных ошибок при интерпретации данных как в случае выпуклого, так и вогнутого рельефа. В то же время, учет поправки на рельеф, заключающийся в дополнительной нормировке относительной интенсивности микросейсмического шума на аналогичную величину для случая однородной среды, обладающей тем же рельефом, позволяет значительно повысить точность получаемых результатов.

Применение поправки для разной выраженности рельефа K, представляющей собой отношение характерного вертикального размера рельефа к горизонтальному, а также контраста между включением и вмещающей средой C, показало, что при $K > 0.4$, что соответствует большинству геофизических объектов, эта поправка практически полностью устраняет вызванные рельефом ошибки при $0.5 < C < 1.5$. При больших контрастах и более выраженном выпуклом рельефе поправка значительно улучшает получаемый при микросейсмическом зондировании результат, но не устраняет значимые ошибки полностью. В случае же вогнутого рельефа поправка обеспе-

чивает почти точный результат во всем исследованном диапазоне параметров.

Таким образом, при обработке данных микросейсмического зондирования геофизических объектов, обладающих рельефом, целесообразно использовать предложенную поправку для уменьшения возможных неточностей, поскольку даже слабовыраженный рельеф (даже при $K = 0.08$) может приводить к ошибкам (порой принципиальным) в интерпретации получаемых результатов, а предложенная поправка уточняет результат во всех рассмотренных случаях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 17-77-10162.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жостков Р.А., Преснов Д.А., Шуруп А.С., Собисевич А.Л.* Сравнение микросейсмического зондирования и томографического подхода при изучении глубинного строения Земли // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 1. С. 72–75.
2. *Горбатиков А.В.* Пат. РФ № 2271554. Бюллетень изобретений. 2006. № 7.
3. *Жостков Р.А., Преснов Д.А., Собисевич А.Л.* Развитие метода микросейсмического зондирования // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2015. Т. 2. № 26. С. 11–19.
4. *Преснов Д.А., Жостков Р.А., Котов А.Н.* Исследование связи амплитуды фонового сейсмического шума с параметрами среды (на примере грязевого вулкана Джау-Тепе) // Сборник научных материалов двадцатой молодежной научной школы по геофизике. 2019. Пермь. Ги УрО РАН. С. 157–161.
5. *Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А., Преснов Д.А., Долов С.М., Данилов К.Б.* Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 28–32.
6. *Попов Д.В., Данилов К.Б., Жостков Р.А., Дударов З.И., Иванова Е.В.* Обработка данных по методу микросейсмического зондирования в программном комплексе dak // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 2. С. 44–57.
7. *Горбенко В.И., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Собисевич А.Л.* Вопросы применимости молекулярно-электронных сейсмоприемников в пассивной сейсморазведке на примере изучения глубинного строения Калужской кольцевой структуры по данным анализа поверхностных волн // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 3. С. 5–19.
8. *Собисевич А.Л., Тверитинова Т.Ю., Лиходеев Д.В., Белобородов Д.Е., Дударов З.И., Долов С.М., Преснов Д.А., Пузич И.Н.* Глубинное строение грязевого вулкана Джарджава в пределах Южно-Керченской антиклинальной структуры // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. № 2. С. 73–80.
9. *Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Горбатиков А.В.* Глубинное строение и режим вулканической и сейсмической активности Приэльбрусья // Геотектоника. 2018. № 6. С. 1–13.
10. *Собисевич А.Л., Горбатиков А.В., Овсюченко А.Н.* Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова // Докл. Акад. наук. 2008. Т. 422. № 4. С. 542–546.
11. *Горбатиков А.В., Собисевич А.Л., Овсюченко А.Н.* Развитие модели глубинного строения Ахтырской флексурно-разрывной зоны и грязевого вулкана Шуго // Докл. Акад. наук. 2008. Т. 421. № 5. С. 670–674.
12. *Французова В.И., Данилов К.Б.* Структура трубки взрыва имени М.В. Ломоносова Архангельской алмазоносной провинции по аномалиям микросейсмического поля // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 71–78.
13. *Яновская Т.Б.* К теории метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2017. № 6. С. 18–23.
14. *Горбатиков А.В., Цуканов А.А.* Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–112.
15. *Цуканов А.А., Горбатиков А.В.* Влияние заглубленных неоднородностей на спектральное отношение горизонтальных компонент случайного поля волн Рэлея // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 1. С. 63–70.
16. *Sezawa K.* On the propagation of Rayleight-waves on plane and spherical surfaces // Bull. Earthquake Res. Inst. (Tokyo). 1927. 2. 21–28.
17. *Sezawa K.* Dispersion of elastic waves propagated on the surface of stratified bodies and on curved surfaces // Bull. Earthquake Res. Inst. (Tokyo). 1927. 3. 1–18.
18. *Oliver J.* Rayleigh Waves on a Cylindrical Curved Surface // Seismological Research Letters. 1955. V. 26. № 3–4. P. 24–25.
19. *Викторов И.А.* Волны типа рэлеевских на цилиндрических поверхностях // Акуст. журн. 1958. Т. 4. № 2. С. 131–136.
20. *Викторов И.А.* О затухании поверхностных волн на цилиндрических поверхностях // Акуст. журн. 1961. Т. 7. № 1. С. 21–25.
21. *Викторов И.А., Каёкина Т.М.* Рассеяние ультразвуковых рэлеевских волн на моделях поверхностных дефектов // Акуст. журн. 1964. Т. 10. № 1. С. 30–33.
22. *Петрашень Г.И.* Задача Рэлея для поверхностных волн в случае сферы // Докл. АН СССР. 1946. Т. 52. № 9. С. 763–766.
23. *Бреховских Л.М.* О распространении поверхностных рэлеевских волн вдоль неровной границы упругого тела // Акуст. журн. 1959. Т. 5. № 3. С. 282–289.
24. *Викторов И.А.* О влиянии несовершенств поверхности на распространение рэлеевских волн // Доклады АН СССР. 1958. Т. 119. № 3. С. 463–466.
25. *Gilbert F., Knopoff L.* Seismic scattering from topographic irregularities // J. Geophys. Research. 1960. V. 65. № 10. P. 3437–3444.
26. *Tuan H.S.* On bulk waves excited at a groove by Rayleigh waves // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. № 1. P. 36–41.
27. *Pareku J.P., Tuan H.S.* Reflection and bulk wave conversion of Rayleigh wave at a single shallowgroove // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. № 3. P. 994–1003.
28. *Ахромеева И.Л., Крылов В.В.* Преобразование волн Рэлея в объемные на локальных дефектах поверхности // Акуст. журн. 1977. Т. 23. № 4. С. 510–516.
29. *Бирюков С.В., Горышник Л.Л.* Отражение рэлеевских волн от локальных неоднородностей поверх-

ности при наклонном падении // Акуст. журн. 1977. Т. 23. № 3. С. 461–462.

30. *Бирюков С.В.* Рассеяние рэлеевских волн двумерными неровностями поверхности при наклонном падении // Акуст. журн. 1980. Т. 26. № 4. С. 494–501.

31. *Полевой В.Г.* Рассеяние акустических поверхностных волн на трехмерных неоднородностях границы // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 1. С. 91–95.

32. *Maradudin A.A., Mills D.L.* The attenuation of Rayleigh surface waves by surface roughness // Annals Phys. 1976. V. 100. № 2. P. 262–309.

33. *Жарылкапов С.Ж., Крылов В.В.* Рассеяние волн Рэлея на выемке произвольной глубины // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 5. С. 878–883.

34. *Angel Y.C., Achenbach J.D.* Reflection and transmission of obliquely incident Rayleigh waves by a surface-breaking crack // J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V. 5. № 2. P. 313–319.

35. *Hirao M., Fukuoka H.* Scattering of Rayleigh surface eaves by edge cracks: numerical simulation and experiment // J. Acoust. Soc. Amer. 1982. V. 72. № 2. P. 602–606.

36. *Tittmann R., Ahlberg L.A., Mal A.K.* Elastic wave scattering from cracks: a review // Traitement du Signal. 1985. V. 2. № 5. P. 443–446.

37. *Keller J.B., Karal F.C.* Geometrical theory of elastic surface wave excitation and propagation // J. Acoust. Soc. America. 1964. V. 36. № 1. P. 32–40.

38. *Rulf B.* Rayleigh waves on curved surfaces // J. Acoust Soc. America. 1969. V. 45. № 2. P. 493–499.

39. *Uberall H.* Surface waves in acoustics // Phys. Acoust. V. 10. N.Y.–L. Academic Press. 1973. P. 1–60.

40. *Babich V.M., Kirpichnikova N.Y.* A new approach to the problem of the Rayleigh wave propagation along the boundary of a non-homogeneous elastic body // Wave Motion. 2004. V. 40. № 3. P. 209–223.

41. *Бабич В.М.* О распространении волн Рэлея по поверхности упругого тела произвольной формы // Доклады АН СССР. 1961. Т. 137. № 6. С. 1263–1266.

42. *Бабич В.М., Русакова Н.Я.* О распространении волн Рэлея по поверхности неоднородного упругого тела произвольной формы // Журн. вычислит. матем и матем. физики. 1962. Т. 2. № 4. С. 652–665.

43. *Крылов В.В.* О волнах Рэлея на гладких поверхностях произвольной формы // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 5. С. 754–759.

44. *Крылов В.В.* Прохождение рэлеевской волны через плавные крупномасштабные неровности поверхности // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 6. С. 1071–1080.

45. *Можаев В.Г.* Применение метода возмущений для расчета характеристик поверхностных волн в анизотропных и изотропных твердых телах с криволинейными границами // Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 5. С. 673–678.

46. *Jin F., Wang Z., Kishimoto K.* Basic properties of Rayleigh surface wave propagation along curved surfaces // International J. Engineering Science. 2005. V. 43. P. 250–261.

47. *Лапин А.Д.* Рассеяние поверхностных волн, распространяющихся вдоль неровной границы жидкость–твердое тело // Акуст. журн. 1969. Т. 15. № 3. С. 387–392.

48. *Лапин А.Д.* Распространение поверхностных волн вдоль искривленных границ // Акуст. журн. 1969. Т. 25. № 2. С. 234–238.

49. *Комиссарова Г.Л.* Свойства поверхностных волн в заполненном жидкостью упругом цилиндре // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 3. С. 315–325.

50. *Biryukov S.V., Gulyaev Yu.V., Krylov V.V., Plessky V.P.* Surface Acoustic Waves in Inhomogeneous Media // Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg. N.Y. 1995. 397 p.

51. *Жостков Р.А.* Программа для моделирования рассеяния волн Рэлея на одиночной особенности рельефа. Номер регистрации 2018665159. 03.12.2018 Бюл. № 12.

52. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.

53. *Дортман Н.Б.* Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. М.: Недра, 1984. 455 с.

54. *Цуканов А.А, Калабухов Д.И., Романов А.И., Горбатиков А.В., Сердобольская М.Л., Грачев Е.А.* Моделирование волн Рэлея в неоднородной среде с использованием вычислительных систем с параллельной архитектурой // Учебное пособие МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет. 2010.

55. *Жостков Р.А.* Программа для обработки синтетических и экспериментальных сейсмограмм в соответствии с методом микросейсмического зондирования. Номер регистрации 2018662815. 13.12.2018 Бюл. № 12.

56. *Кокшайский А.И., Коробов А.И., Ширгина Н.В.* Диагностика упругих свойств плоской границы двух шероховатых сред поверхностными акустическими волнами // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 2. С. 152–157.

57. *Коробов А.И., Агафонов А.А., Изосимова М.Ю.* Нелинейные упругие волны в твердотельном изотропном клине с дефектами // Журн. техн. физики. 2018. Т. 88. № 3. С. 385–391.

58. *Жостков Р.А.* Совершенствование некоторых методов сейсморазведки с помощью данных о рассеянии волн Рэлея на рельефе // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 11. С. 1555–1559.

59. *Собисевич А.Л., Жостков Р.А.* Об учете влияния рельефа в методе микросейсмического зондирования // ДАН. 2018. Т. 4. № 481. С. 1–4.

60. *Жостков Р.А.* Влияние рельефа на оценку структуры геологических объектов // Материалы VI Международной научно-практической конференции Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование. Москва, 2018. С. 39–44.