А. В. Масюков

ООО "СЛАВНЕФТЬ-НПЦ", ТВЕРЬ

ДИФРАКТОРЫ В ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Г. И. Петрашень и А. Г. Рудаков утверждают [5], что "метод точечных моделей сейсмических сред" не имеет научного обоснования, они пишут "о серьезном неблагополучии в физико-математических основаниях метода". А "методом точечных моделей" Г. И. Петрашень и А. Г. Рудаков называют варианты дифракционного суммирования - основного метода построения сейсмических изображений. Может быть, мы поняли формулы статьи [5] неправильно? Нет, из комментариев М. С. Денисова [2] тоже следует, что речь идёт именно о дифракционном суммировании: "почему оно работает?". А когда предлагается [4] строгое объяснение (без Гюйгенса, Кирхгоффа и Аристотеля), этого не замечают - "нет ясной целенаправленности" [6]. А как же призыв "искать достоверные обоснования зачастую интуитивно "нащупанным" алгоритмам обработки данных" [2]?

Можно вообще отказаться от слова "дифрактор" (это лучше, чем понимать его по-разному). Не использовать слова "дифракционное суммирование" ещё проще. Но не следует забывать, что *Kirchhoff-type migration* и есть дифракционное суммирование. Приоритетная статья Ю. В. Тимошина 1970 г. *New possibilities for imagery* входит в *SEG geophysics reprint series, no. 4: Migration of seismic data.* И совсем странно читать в комментарии М. С. Денисова [3] на заметку [4] следующее: "В самом деле, причём здесь *неоднородные* среды, если Г. П. и А. Р. рассуждают о свойствах *однородных* сред? Зачем столько рассуждений про миграцию, ... если слово "миграция" в статье [5] вообще *не используется*? Почему в [4] *ни разу* не упоминается принцип Гюйгенса, анализу которого посвящена вся целиком работа [5]?" (курсив М. С. Денисова). Ответим. По аксиоме Глоговского в случае горизонтально-слоистой среды достаточно одной скважины. Сколько скважин нужно в однородной среде? Какое отношение "рассуждения о свойствах однородных сред" имеют к сейсморазведке? Почему "рассуждения о свойствах однородных сред" и принципе Гюйгенса задели многих сейсморазведчиков? А потому, что вместо понятных нам слов "миграция", "построение сейсмического изображения", "дифракционное суммирование" авторы [5] используют свое (эквивалентное?) понятие "метод точечных моделей" и приходят к выводу, что "все результаты, полученные в рамках метода точечных моделей сейсмических сред, следует считать неправильными и нуждающимися в пересмотре, равно как пересмотра же требуют и направления дальнейшего развития технологичной сейсморазведки" [5]. То есть никак не "вся целиком" работа [5] посвящена принципу Гюйгенса. Мы считаем (это не только личное мнение), что "метод точечных моделей" (то есть дифракционное суммирование, миграция) подтверждён практикой, не требует пересмотра, и доказываем, что для обоснования здесь совсем не требуется "ложный принцип Гюйгенса", который исчерпывающе рассмотрен в статье [5]. Поэтому-то в заметке [4] он даже не упоминается. (На самом деле результаты, представленные в [4], появились как раз потому, что автора тоже совершенно не устраивали имеющиеся в литературе по сейсморазведке ссылки на Гюйгенса - хотя бы здесь мы все согласны друг с другом.)

Если теория и практика не всегда "дружат" [1] в отечественной сейсморазведке, то следующим "логичным" шагом может быть её закрытие с передачей работ более квалифицированным иностранным специалистам, которые "дружат" лучше. Уже поэтому действительно необходимо разобраться с терминологией и "физико-математическими основаниями".

1. О ПОНЯТИЯХ И ОБОЗНАЧЕНИЯХ

Достаточно произвольная функция точки трёхмерного пространства может быть представлена в виде

$$u(x)=\int_{R^3} f(y)\,g(x,y)\,dy, \qquad (1)$$

где

$$g(x,y)=\frac{\exp\left(ik\left|x-y\right|\right)}{\left|x-y\right|}, \qquad (2)$$

так как функции (2) образуют базис (в силу того, что преобразование Фурье по x функции g не обращается в ноль). На частоте $\omega = kc_0$ волновое уравнение превращается в уравнение Гельмгольца

$$c^2(x)\,\nabla^2 u + k^2 c_0^2\, u(x) = 0, \qquad (3)$$

где $c(x)$ - скорость в среде; c_0 - некоторая постоянная скорость. Уравнение (3), дополненное граничными условиями, называется задачей дифракции. Решение задачи дифракции (все рассеянное поле, а не только рассеянное на "вкраплениях") может быть представлено в виде (1). При этом функция f называется (в физике) плотностью вторичных источников, или дифракторов. Если в некоторой части среды $x \in D \subset R^3$ скорость $c(x) = c_0$ (постоянна), то из (1 - 3) сразу следует, что $f(x) = 0$ при $x \in D$. М. С. Денисов объясняет это подробнее [2, 3], сначала задавая вопрос "где живут дифракторы?", а потом отвечая: в однородной среде дифракторов нет, они связаны с неоднородностями среды.

Следующий вопрос: как "живут" дифракторы? Пусть, например, мы хотим вычислить поле, отражённое гладкой кровлей пласта, находящегося в однородной среде, имеющей скорость c_0. Интеграл (1) при численном решении аппроксимируется конечной суммой, при этом достаточно расставить точки суммирования только на границе пласта так, чтобы на длине волны было не слишком мало точек. Если в каждой точке суммирования назначить значение функции f, пропорциональное амплитуде падающего поля в этой точке, то мы уже получим кинематически правильное решение, так как фронт отражённой волны является огибающей фронтов дифрагированных волн. Последнее всем хорошо известно, и ещё раз объясняет М. С. Денисов [2] (как и то, что существенная часть суммирования по годографу дифрагированной волны определяется областью его касания с годографом отражённой волны). Если же мы хотим получить решение, правильное не только кинематически, то функцию f в точках суммирования, надо найти из решения задачи дифракции (3). Вот ТАК "живут" дифракторы и, наверное, никак иначе.

Если не придумывать понятия дифрактора, отличного от принятого в физике, то дифракторы не следует ассоциировать с какими-то "вкраплениями". В случае слоистой среды плотность дифракторов f в решении (1) задачи дифракции (3) определяется главным образом геометрией пластов и коэффициентами отражения, а уже потом шероховатостью границ (в масштабе длины волны), изменениями пористости, "вкраплениями", и т. п. (Однако коллекторы бывают не только пластовые, и как сейсмические изображения связаны с их акустическими неоднородностями, тоже следовало разобраться [4].)

Понятие "точечная модель среды" в физике не используется, дискретные модели тут ни при чем. Разумеется, речь идет о сплошных средах, это понятие (как и понятие базиса) объясняет М. С. Денисов [3]. При этом выясняется, что гранулярный коллектор тоже можно рассматривать в сейсморазведке как сплошную среду. Если бы кто-то бессмысленно решал задачу дифракции, задаваясь всей геометрией скелета пористой породы, он пришел бы к тому же решению. (Рассеяние на протяжённых трещинах тоже имеет вид (1), вопросом может быть только адекватность существующих моделей трещин горным породам.)

Ни борновского, никакого другого приближения здесь ещё нет: рассеянное поле всегда имеет вид свертки функции плотности дифракторов с полем точечного источника, т. е. фундаментальным решением соответствующего уравнения в частных производных. (Для упрощения здесь говориться только о волновом уравнении, в отличие от [4].) Вопросы о том, являются дифракторы "математическими" или "геофизическими", "материальными" или "виртуальными", относятся к противоестественным наукам, как и вопрос о "реальности" гармоник Фурье.

2. СУЩЕСТВО ПРОБЛЕМЫ

Теперь от терминологии можно перейти к действительно важному вопросу - научному обоснованию дифракционного суммирования (миграции). Г. И. Петрашень и А. Г. Рудаков прекрасно объяснили [5], что Гюйгенс тут не помогает. Самым прямым теоретическим доказательством корректности дифракционного суммирования являлась бы выполненная в общем случае аналитическая подстановка решения задачи дифракции в оператор миграции. При этом должно получиться - иначе теория не соответствовала бы практике - выражение результирующего (мигрированного) сейсмического изображения через акустическую жёсткость среды. В частном случае слоистой среды это выражение должно сводиться - иначе теория не соответствовала бы практике - к используемой в инверсии свёрточной модели сейсмической трассы. Так оно и получается [4].

Конечно, не все так просто. Первая сложность заключается в том, что общего - для произвольной среды - аналитического решения задачи дифракции (3) нет и быть не может. Единственное общее решение, не требующее предельного перехода длины волны к нулю, получается в предельном случае

$$\alpha(x) \equiv \left(c(x)-c_0\right)/c_0 \to 0. \qquad (4)$$

В этом случае плотность дифракторов $f(x)$ в формуле (1) просто пропорциональна $\alpha(x)$. Это и есть борновское приближение. Не останавливаясь на деталях, можно сказать, что в работе [4] предлагается подтверждаемая практикой сейсморазведки формула связи между сейсмическим изображением и акустической жёсткостью среды, установленная в предельном случае (4) бесконечно малых (по контрастности, а не по размеру) неоднородностей при их произвольном пространственном распределении. Это мало? В “сухом остатке” у нас связь между неоднородностями среды (прежде всего, это отражающие границы пластов) и сейсмическим изображением. Плотность дифракторов как форма записи рассеянного поля - это промежуточное звено.

Наверное, Г. И. Петрашеня и А. Г. Рудакова надо поблагодарить за совершенно правильную постановку проблемы. В статье [5] (стр. 89) выдвинуто принципиальное положение, смысл которого (в понятной нам терминологии) следующий: *в сейсморазведке без достаточных на то оснований считается, что миграция сейсмических данных решает задачу оценивания физических свойств среды в каждой точке мигрированного изображения (точке фокусировки).* Действительно, как можно, приписывая точке фокусировки сумму по годографу дифрагированной волны, считать это шагом решения обратной задачи сейсморазведки, не задумываясь о рассеивающих свойствах среды? Сформулированная таким образом проблема не имеет отношения к “реальности дифракторов”, “похожести формул” и прочей филологии. Рассматривая эту проблему, мы получили, что - в борновском приближении рассеяния и с учётом ограниченности спектра сигнала - в мигрированных разрезах действительно определённым образом изображаются акустические свойства среды [4]. Является ли это достаточным основанием? Только если борновское приближение считать достаточно точным для описания рассеяния волн в сейсморазведке.

Поставленная проблема имеет отношение не только к миграции “по Кирхгоффу”. При постоянной миграционной скорости все методы миграции эквивалентны. На практике мигрированные разрезы, полученные с помощью разных компьютерных программ (даже реализующих один и тот же метод), различаются. Одна и та же компьютерная реализация миграции при изменении параметров даёт различные результаты. Г. И. Петрашень и А. Г. Рудаков напоминают [5], что мы решаем обратную задачу, следовательно, сравнение миграций между собой не отменяет принципиальной проблемы сопоставления сейсмического изображения со средой, которую мы изображаем.

3. ДВА МАСШТАБА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СРЕДЫ

Анализ М. С. Денисова [3] точности борновского приближения можно дополнить следующим утверждением: оно не обладает достаточной точностью для непосредственного моделирования сейсмограмм. Тем не менее оно давно используется в теоретических исследованиях, относящихся к сейсморазведке. С этим следует разобраться. Пусть, например, скорость в разрезе меняется от 1500 до 4000 м/с. Конечно, такие большие относительные изменения скорости никак не соответствуют условию (4). Известный трюк состоит в том, чтобы скорость c_0 считать не постоянной, а взять в качестве $c_0(x)$ гладкий тренд скорости $c(x)$. А именно, разложить решение уравнения дифракции

$$c^2(x)\nabla^2 u + \omega^2 u(x) = 0 \tag{5}$$

по базису, состоящему из фундаментальных решений оператора

$$c_0^2(x)\,\nabla^2 + \omega^2. \tag{6}$$

Тогда представление (1) остаётся справедливым, но функция g уже не поле точечного источника в однородной среде, а поле точечного источника в среде со скоростью $c_0(x)$. Понятно, что коэффициенты разложения того же поля по новому базису, т. е. плотность дифракторов, другие. Применение теории возмущений (борновского приближения) становится существенно более точным, так как истинная скорость $c(x)$ имеет намного меньшие отклонения от $c_0(x)$, чем от постоянной скорости. Например, пусть в баженовской свите скорость $c(x) = 2400$, а $c_0(x) = 3000$ м/с (такая скорость может быть выше и ниже), тогда $\alpha(x) = \dfrac{600}{3000} = 0,2$ здесь, а другие коэффициенты отражения, как правило, ещё меньше. При таких α уже можно было бы применять борновское приближение для моделирования разреза нулевого удаления. Именно модель совмещённого источника и приёмника используется в [4], потому что, как правильно отмечено в [3], борновское приближение даёт неправильную угловую зависимость коэффициента отражения. Но при нулевом удалении “в игре” только отражения по нормали к отражателю, где у борновского приближения всё в порядке, а преломления (рефракция) в вышележащей среде со скоростью $c_0(x)$ могут быть любыми - они не относятся к возмущениям.

Если приведённые рассуждения о точности борновского приближения не вполне понятны - не так важно. Можно считать, что результат, представленный в [4], получен в совершенно идеальном случае. Важно понимать другое. Разделение скорости среды $c(x)$ на сумму гладкого тренда $c_0(x)$ и остатка $c(x)$ - $c_0(x)$ является не просто теоретическим трюком для обоснования применимости теории возмущений. Наоборот, здесь теория просто идёт за практикой. В дифракционном суммировании используется поле времен, соответствующее некоторой гладкой (миграционной) скорости $c_0(x)$, где x - точка среды (латеральное положение и глубина). Миграционная скорость содержит низкие пространственные частоты скорости среды $c(x)$, т. е. описывает только её крупномасштабные неоднородности. Разность $c(x)$ - $c_0(x)$ содержит высокие пространственные частоты - мелкомасштабные неоднородности. Крупномасштабные неоднородности $c_0(x)$ совсем не отображаются в мигрированных разрезах, изображаются мелкомасштабные отклонения истинной скорости $c(x)$ от миграционной скорости $c_0(x)$. Миграционный оператор “работает” потому, что является некоторым обращением возмущения оператора рассеяния, вызванного возмущением скорости [4]. Это не качественное рассуждение, а математический результат. В случае слоистой среды градиент гладкой миграционной скорости почти не влияет на коэффициенты отражения, которые “сидят” в $c(x)$ - $c_0(x)$ и - изображаются.

Итак, объективно есть два масштаба неоднородностей: мелкие изображаются, крупные определяют изображающий оператор. Соответственно, обратная задача, которую решает сейсморазведка, разделяется на две основные части: 1) оценивание миграционной скорости (крупный масштаб), 2) построение сейсмического изображения (мелкий масштаб неоднородностей) при известной миграционной скорости. Что касается первой части, следует обратиться, в частности, к работам В. М. Глоговского и М. С. Денисова. С теоретическим обоснованием второй части (какие неоднородности и как изображаются) можно обойтись без принципа Гюйгенса, но с привлечением первого порядка теории возмущений [4]. Это не означает, что не остаётся никаких вопросов. Но вот Гюйгенс и его принцип, конечно, не могут иметь никакого отношения к обратной задаче сейсморазведки [5].

4. ОБНАРУЖЕНИЕ ДИФРАКТОРОВ

Проблему, поставленную Г. И. Петрашенем и А. Г. Рудаковым [5], мы поняли как утверждение о недопустимости некоторых (вполне определенных) “обоснований” дифракционного суммирования. Соответственно, было предложено [4] самое прямое обоснование, какое только может быть, являющееся не рассуждением о точечных дифракторах, а выводом уравнения связи между физическими свойствами среды и мигрированными изображениями. Это уравнение получено в рамках некоторой теоретической модели, которая является, конечно, упрощённой и приближённой. Математическая модель сама по себе не может быть плохой или хорошей, она может соответствовать или не соответствовать практике. У нас получается, что (мелкомасштабные - см. пункт 3) неоднородности среды (в том числе - отражающие границы) понятным образом изображаются в мигрированных разрезах. При этом главная неоднородность слоистой среды - по нормали к залеганию пластов; она описывается коэффициентами отражений и, как правило, хорошо обнаруживается. Вопрос обнаружения дифрагирующих неоднородностей, которые не сводятся к модели гладких протяжённых отражающих границ, не имеет прямого отношения к существу проблемы (см. пункт 2), поставленной Г. И. Петрашенем и А. Г. Рудаковым. Однако этот актуальный вопрос обсуждает М. С. Денисов [3].

Утверждается, что “на достаточно большом расстоянии от области, содержащей вкрапления, волна “забывает” о взаимодействии с ними... влияние дифракторов на фронт волны может наблюдаться только в ближней зоне, при этом линейный размер этих дифракторов должен превосходить длину волны... минимальный размер “точечных” дифракторов должен составлять не меньше нескольких метров, иначе волна их просто “не заметит” и будет взаимодействовать со средой так, как будто среда была однородной” [3]. Все почти правильно. У дифрагированной волны свой фронт. При удалении от уединенного дифрактора - чисто геометрически - энергия дифрагированной волны все меньше интерферирует с проходящей волной, поэтому и получается “затягивание волнового фронта”, о котором говорит М. С. Денисов. Но это совсем не означает, что дифрагированная волна исчезает в дальней зоне. Соответственно, в сейсморазведке было бы бессмысленно пытаться обнаруживать дифрагирующие объекты по искажению фронта отражённой волны. На всякий случай, ещё раз повторим: в формализме задачи дифракции и в применении к ней теории возмущений отражённые волны тоже описываются плотностью дифракторов, которая в слоистой среде определяется коэффициентами отражений. Однако вполне корректно мысленно (и не только мысленно) разделять рассеянное поле на отражённые и дифрагированные волны, как это делает (мысленно) М. С. Денисов и другие сейсморазведчики (не только мысленно). Отметим также, что для эффекта “затягивания фронта” имеется очевидный контрпример: дифракционная решётка. Дифракционная решётка - это тоже неоднородности, при рассеянии на которых “затягивания волнового фронта” в дальней зоне не происходит. Можно напомнить, что дифракционная решётка реализуется, в частности, в кристаллографии. (Пусть кто-то поймет, что дифракторы в сейсморазведке - это атомы.)

Вполне очевидно, что при $a << 1$

$$\int_{b-a}^{b+a} f(x)\, e^{i2\pi x/\lambda}\, dx \approx e^{i2\pi b/\lambda} \int_{b-a}^{b+a} f(x)\, dx. \qquad (7)$$

Это означает, что оценить размер и внутреннюю структуру неоднородности, которая меньше длины волны, более чем затруднительно. Изображение такой неоднородности на мигрированном разрезе определяется не её размером, а спектром сигнала - в пространстве и интегральной характеристикой типа (7) - по амплитуде. Сама возможность обнаружения дифрагирующей неоднородности (и её визуализации при обработке данных сейсморазведки) определяется не только размером, но и 1) её контрастностью; 2) коэффициентами отражения в разрезе и уровнем шума; 3) кратностью системы наблюдения и динамическим диапазоном регистрации. При точной регистрации в отсутствие шума и других сигналов уединённая неоднородность гарантированно обнаруживалась бы, независимо от её размера. Как интерферируют на сейсмических изображениях различные неоднородности (например, выклинивания пластов), мы и пытались разобраться [4].

Практическим достижением сейсморазведки на основе разделения отражённых и дифрагированных волн является обнаружение и картирование областей аномального рассеяния, которые оказываются связанными с разуплотнением пород и улучшенными коллекторами, размеры таких областей составляют сотни метров. Работы были проведены на десятках объектов, результаты подтверждены бурением и эксплуатацией. Речь идёт о составной части сейсмоакустических технологий, за разработку которых присуждена премия Правительства РФ в области науки и техники 2008 года (О. Л. Кузнецов, С. Л. Арутюнов, В. П. Дыбленко, С. М. Карнаухов, Ю. А. Курьянов, Ю. В. Лукьянов, Б. Ю. Мельчук, В. Н. Рябченко, И. А. Чиркин, С. И. Шленкин).

Удаётся также обнаружить десятиметровые материально-точечные дифракторы, из которых состоят горные породы, но - только в статье [3].

5. О ТОЧНОСТИ БОРНОВСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ

Наряду с полезными и поучительными рассуждениями в статье [3] есть неточности. Например, выводится, что "для корректности борновского приближения требуется, чтобы линейный размер неоднородных вкраплений, присутствующих в горной породе, был не меньше 6 м". Во-первых, здесь ошибка в знаке неравенства. М. С. Денисов наносит на весьма условную диаграмму из знаменитой книги К. Аки и П. Ричардса - рис. 2 в статье [3] - линии, соответствующие оценкам Л. А. Чернова. Достаточно понимать смысл борновского приближения рассеяния или просто посмотреть на знаки в неравенствах Чернова (они приведены в [3]), чтобы увидеть, что область адекватности борновского приближения находится не над, а *под* цветными линиями, нанесёнными на диаграмму из Аки-Ричардса, что приводит к полной путанице на рис. 2 в [3]. То есть, на самом деле М. С. Денисов получает, что для корректности борновского приближения требуется, чтобы линейный размер неоднородностей был *не больше* 6 м.

А почему 6 метров, а не 6,66? Для получения оценки задается, в частности, некоторая контрастность неоднородности, а также принимается, что 0,1 << 1 [3]. А 0,2 << 1? Может быть, даже 0,3 << 1? Одна десятая от зарплаты геофизика - это мало, а одна сотая от госбюджета - это много. В обозначении << присутствует большая неопределённость, в данном случае - неустранимая.

При *уменьшении* длины волны и *увеличении* размера неоднородности (контрастность которой сохраняется) борновское приближение, конечно, начинает отклоняться от точного решения задачи дифракции. (Величину этого отклонения в общем случае оценить невозможно.) Со стороны *уменьшения* размера неоднородностей ограничений у борновского приближения как раз нет. (Но и нет смысла при наших длинах волн считать отдельные зерна песчаника неоднородностями, как обсуждалось выше в связи с понятием сплошной среды.)

Изменение знака неравенства в оценке статьи [3] на противоположный не имеет отношения к "точечности" или "неточечности" дифракторов. Если понятие дифрактор (см. пункт 1) вызывает у кого-то странные ассоциации, можно от этого слова вообще отказаться и говорить только о неоднородностях среды, которые и являются целью сейсморазведки. Существо проблем (см. пункт 2) от этого не изменяется.

Хочется также надеяться, что больше никого не удивит сочетание лучевого и борновского приближений в применении к обратной задаче сейсморазведки. В полном соответствии с диаграммой из Аки-Ричардса, а главное, с физикой, рефракция на крупномасштабных (см. пункт 3) неоднородностях миграционной скорости, не приводящая к рассеянию падающего поля в сейсмоприёмники, может быть рассмотрена в лучевом приближении - оно применяется для нахождения фундаментальных решений оператора (6). А рассеяние на мелкомасштабных неоднородностях (только оно и регистрируется), связанное с относительно небольшими отклонениями скорости в среде от миграционной, может рассматриваться в борновском приближении. Наверное, последнее подтверждается оценкой М. С. Денисова (если поменять знак и учесть её неопределенность).

Представляется, что - на качественном уровне - математическая теория, которая начинается, скажем, с формул (5) и (6), полностью соответствует представлениям многих опытных сейсморазведчиков, в т. ч. представлениям о дифракторах (хотя без этого термина можно обойтись). Можно было бы сформулировать - по пунктам - выводы из проведённого здесь анализа. Однако было бы более предпочтительно прийти к согласию с уважаемыми оппонентами и сформулировать выводы дискуссии коллегиально.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ампилов Ю. П.*, 2008, Теория и практика не всегда "дружат" в сейсморазведке: Технологии сейсморазведки, **2**, 95 - 96.
2. *Денисов М. С.*, 2008, Где живут дифракторы: Технологии сейсморазведки, **2**, 97 - 101.
3. *Денисов М. С.*, 2009, Смог ли М. Борн подружить теорию и практику сейсморазведки: Технологии сейсморазведки, **1**, 112 - 118.
4. *Масюков А. В.*, 2008, Борновское приближение как основание теории сейсмических изображений: Технологии сейсморазведки, **3**, 103 - 105.
5. *Петрашень Г. И., Рудаков А. Г.*, 2008, О недопустимых искажениях законов природы в фундаментальных задачах технологичной сейсморазведки: Технологии сейсморазведки, **2**, 86 - 94.
6. *Рудаков А. Г.*, 2009, Комментарий к статье А. В. Масюкова "Борновское приближение как основание теории сейсмических изображений": Технологии сейсморазведки, **1**, 119.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Андрей Вадимович МАСЮКОВ - начальник отдела исследований ООО "Славнефть-НПЦ", доктор физ.-мат. наук.