

УДК 550.834

НЕКОТОРЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПЛАСТОВОЙ ГЛУБИННО-СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ

Анисимов Р.Г.¹, Давлетханов Р.Т.¹

¹ Яндекс Терра (ООО «Сейсмотек»). 143026, Россия, Москва, Территория инновационного центра «Сколково», ул. Луговая, д. 4, корпус 2, помещение 14; e-mail: r.anisimov@yandexterra.ru, r.davletkhanov@yandexterra.ru

Аннотация. К настоящему времени известно много методов построения глубинно-скоростной модели (ГСМ) среды. На практике применяют существенно более ограниченный набор алгоритмов. В статье будут показаны некоторые технологические приемы построения пластовой ГСМ, которые являются более-менее универсальными с той точки зрения, что могут быть использованы в самых разнообразных сейсмогеологических условиях. Ограничением является то, что алгоритмы ориентированы на пластовую модель среды, но расширение множества моделей пласта позволяет считать такое ограничение не обременительным для решения практических задач.

Ключевые слова. Обработка сейсмических данных, обратная кинематическая задача, глубинно-скоростная модель, пластовая модель, сейсмическая томография, сейсмическая анизотропия.

SOME TECHNOLOGICAL METHODS USED FOR LAYER-BASED VELOCITY-DEPTH MODEL BUILDING

Anisimov R.G.¹, Davletkhanov R.T.¹

¹ Yandex Terra (Seismotech, Ltd.). Office 14, building 4/2, Skolkovo Innovation Center, Lugovaya street, Moscow, Russia, 143026; e-mail: r.anisimov@yandexterra.ru, r.davletkhanov@yandexterra.ru

Abstract. Nowadays there are a plenty of methods of velocity-depth model building. However, just a few algorithms are used in practice. In the paper we will show some technological methods of velocity-depth model building, which are more or less universal from the point of view that they may be used in a wide variety of seismic-geological conditions. Their limitation consists in their orientation to layered model, but the extension of a set of layered models lets us consider this limitation has no influence on practical problems solving.

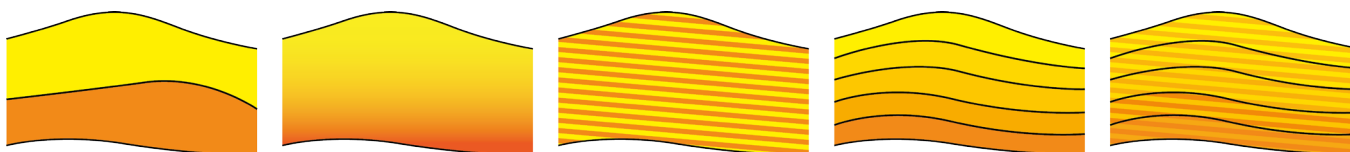
Key words. Seismic data processing, kinematic inverse problem, velocity-depth model, layer-based model, seismic tomography, seismic anisotropy.

ВВЕДЕНИЕ. В последние десятилетия в практике сейсморазведки все большую популярность приобретают методы построения глубинно-скоростной модели (ГСМ) среды в расширенных классах моделей (рис. 1).

Исследуются градиентные и анизотропные (преимущественно трансверсально-изотропные) свойства среды, изучаются рассеянные компоненты волнового поля, большое внимание уделяется динамическим параметрам. Между тем давно известные свойства обратной кинематической задачи сейсморазведки: ее структурная неустойчивость (неустойчивость по модели), некорректность в расширенных классах моделей – декларируются, но на практике игнорируются. Не будем повторять эти широко известные истины, а обратим внимание на то, что преодоление неопределенностей в решении обратной задачи должно опираться на априорную информацию. Этот тезис сам по себе также повисает в воздухе,

если речь не идет о конкретном районе, конкретных сейсмогеологических условиях, наличии скважинных данных и плохо формализуемых, но всегда имеющихся сведениях геологического характера. Популярное средство построения сеточных моделей среды томографическими методами зачастую могут приводить к одиозным решениям и, во всяком случае, должны контролироваться перечисленными данными, для чего необходим специальный инструментарий.

Обработка сейсмических данных состоит из множества этапов. Манипуляции, проводимые с данными на каждом из этапов обработки, основаны на некоторой базовой модели (будь то модель формирования сейсмического импульса или модель среды). Геофизики на разных этапах обработки зачастую опираются на разные модели, которые могут находиться в противоречии друг с другом. Например, нередко обработка начинается в модели средних ско-



Изотропная двухслойная модель

Модель с вертикальным градиентом скорости

Анизотропная модель

Модель со стратиграфической разбивкой

Анизотропная модель со стратиграфической разбивкой

Рис. 1.
Типы расширенной параметризации модели пласта

ростей, верхняя часть разреза (ВЧР) описывается моделью статики, параметры статических поправок и скоростей суммирования подбираются так, чтобы обеспечить хорошие условия суммирования. Однако на последующих этапах обработки модель среды усложняется с целью получения более детального ее строения и, в конечном счете, построения глубинного изображения, сопровождаемого принятым набором атрибутов.

По нашему мнению, все наработанные приемы, используемые в практике обработки, хорошо подходят для параметризации кинематических параметров. Однако эти приемы необходимо отделять от этапа построения модели, который должен приниматься во внимание с первых шагов обработки. В статье мы расскажем, каким образом, с нашей точки зрения, должна строиться обработка, с ранних этапов ориентированная на построение ГСМ среды, а также опишем, какие средства для этого имеются.

Параметризация годографа ОСТ отраженной волны через аналитическую функцию и трендовую составляющую статических поправок

Успех решения кинематических задач в сейсморазведке во многом определяется надежностью определения параметров поля времен. Здесь мы рассматриваем только отраженные волны. В простых случаях годограф ОСТ отраженной волны может быть хорошо описан гиперболой, но для более сложных ситуаций (рельеф, сильные преломления, петли) был разработан и применяется на практике метод кинематико-динамического преобразования, смысл которого заключается в миграции данных в некоторой модели, описании остаточной кинематики в глубинной области и последующей кинематической демиграции описанных глубинных кривых или поверхностей во временную область [Глоговский и др., 1982; Лангман, Силаенков, 2011].

Однако ни гиперболический анализ, ни кинематико-динамическое преобразование не могут

справиться с условиями очень сложной ВЧР, в результате влияния которой годограф усложняется настолько, что не описывается никакой аналитической функцией, а плотность данных совместно со сложной формой годографа не позволяют выполнить надежное прослеживание отраженных волн. По этим причинам на первом этапе подбираются такие кинематические параметры отраженной волны от выбираемой определенной образом границы и такой набор поверхностно-согласованных статических поправок, которые будут давать наилучшее качество суммирования в окрестности выбранной границы. При этом существенным образом могут искажаться реальные (наблюдаемые) времена отраженной волны, в том числе азимутальные составляющие кинематических параметров. В процессе построения ГСМ это может привести к серьезным структурным искажениям. Поэтому лучшим решением будет попытка учесть все средне- и длиннопериодные аномалии, связанные с ВЧР, в ГСМ посредством построения ее кинематического эквивалента. Для этих целей было предложено параметризовать годограф ОСТ отраженной волны с помощью гиперболы и гладкой компоненты статических поправок [Давлетханов, Силаенков, 2016]. Другими словами, сначала данные проходят через процедуру подгонки под гиперболический годограф при помощи статических поправок, а затем реальная кинематика выражается через времена гипербол и соответствующих статических поправок за источник и приемник (точнее, гладкие составляющие поправок, которые можно учесть с помощью ГСМ). Отметим, что помимо гиперболы можно использовать любую другую аналитическую функцию, однако для описания поля времен более сложными функциями требуется соответствующее уплотнение сейсмических съемок, что не всегда возможно.

Был проведен численный эксперимент с использованием ГСМ, изображенной на рис. 2, а. Суть эксперимента состояла в нахождении положения

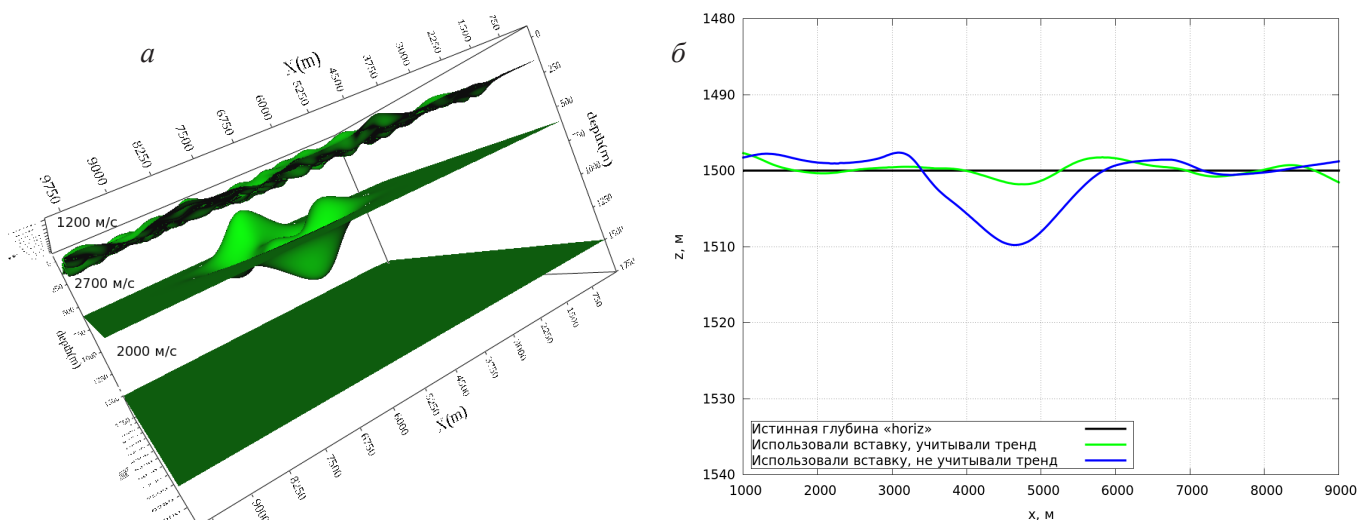


Рис. 2. Восстановление глубины третьего горизонта с использованием поля времен, описанного разными способами: а) истинная 3D модель; б) пример сечения последнего горизонта (пояснения в тексте)

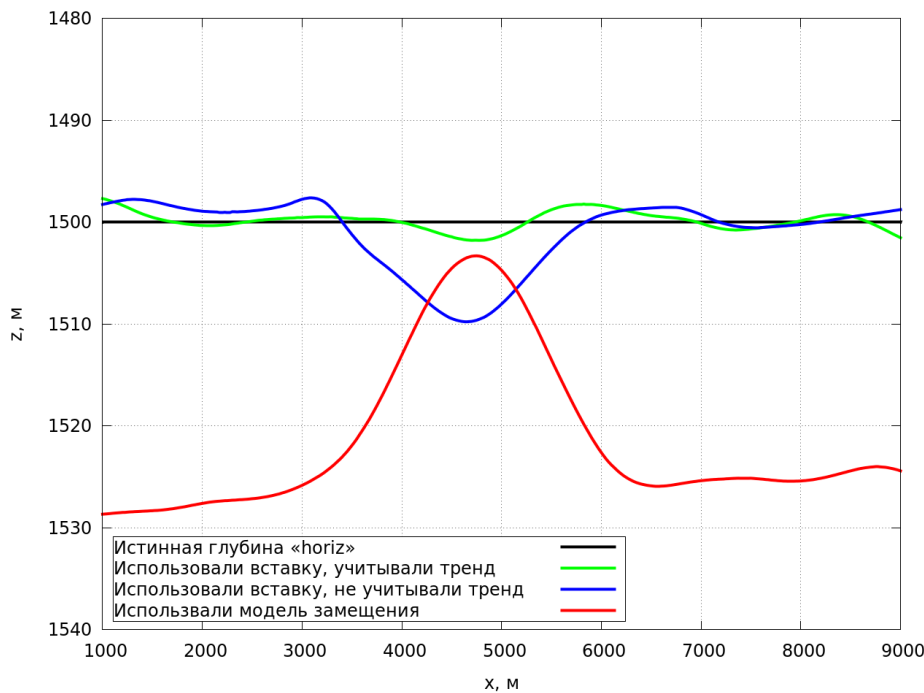


Рис. 3.
Дополнение рис. 2, б еще одним графиком (красная кривая – сечение последнего горизонта, полученного без использования реконструкции первого горизонта). Остальные обозначения как на рис. 2, б

последней (горизонтальной) границы с использованием двух разных полей времен:

1. Годограф – гипербола. Полученная из такого описания глубинная граница обозначена на рис. 2, б синим цветом.
2. Годограф – сумма гиперболы и гладкой компоненты статических поправок. Полученная из такой параметризации глубинная граница обозначена на рис. 2, б зеленым цветом.

Мы получили, что исключение гладкой компоненты статических поправок из всего набора статистики и использование этой компоненты для описания кинематики позволило точнее восстановить истинное положение глубинного горизонта, который на рисунке обозначен черным цветом. Забегая вперед, отметим, что здесь для построения ВЧР применялась реконструкция первого горизонта (метод описан далее): первая граница была реконструирована на основе известного положения второго горизонта.

При обработке сухопутных данных (а зачастую и морских) успех в решении задач глубинных построений во многом определяется корректным учетом влияния ВЧР, поэтому следующим важным шагом после описания поля времен является построение кинематически эквивалентной модели ВЧР. Для этих целей могут быть использованы инструменты вставки горизонта и томографии. При этом необходимо знать априорное глубинное положение некоторого опорного горизонта, без этой информации задача не может быть решена в принципе.

Вставка горизонта (реконструкция слоя)

Данный инструмент разрабатывался для решения задачи построения ГСМ при наличии априорной информации о конфигурации отражающего горизонта и сложной неоднородной толщи над ним, в которой устойчивые отражения от промежуточных границ не сформированы, что не позволяет вклю-

чить эти неоднородности в модель. Такие условия характерны для сложной ВЧР, мерзлоты, подсолевой зоны и т.п. Смысл метода заключается в разбиении рассматриваемой толщи на два интервала с индивидуальными скоростными характеристиками с целью отыскания кинематического эквивалента пласта, обеспечивающего при фиксированном положении отражающей границы минимальную невязку между наблюдаемыми временами и теми, которые соответствуют подбираемой модели. Способ был предложен В.М. Глоговским и использовался им в 2D исполнении для построения и доказательства наличия кинематически эквивалентных моделей [Глоговский, Лангман, 2009; Glogovsky и др., 2009].

Технически алгоритм состоит из двух этапов [Анисимов, Лангман, Фиников, 2015, ч. 1]. На первом этапе, при некоторых предполагаемых скоростях над и под вставляемой границей по нормальным лучам отстраивается преломляющая граница, обеспечивающая соблюдение баланса времен t_0 . Данная задача имеет единственное решение. После этого моделируется временное поле отраженной волны для проверяемых скоростей и построенной преломляющей границы. Из всех возможных пар скоростей выбирается пара, обеспечивающая наилучшее совпадение модельных и реальных времен. Проблема выбора оптимума может быть решена при помощи использования алгоритмов численной оптимизации или же отдана на решение геофизику посредством построения соответствующих спектров. Также возможен и часто применяется на практике вариант задачи с фиксированной скоростью в верхнем или нижнем интервале с целью получения более ожидаемого решения и удовлетворения имеющимся априорным сведениям о распределении скоростей. Описанная выше задача оптимизации носит локальный характер, другими словами, скорости анализируются на некоторой заданной сетке и на некоторой локальной базе решения. При этом предполагается, что локаль-

но скорости можно описать константой. Правомерность данного предположения очень сильно зависит от мощности рассматриваемой толщи и степени неоднородности скоростей в реальной среде. Тем не менее, метод позволяет «выбирать» основные скоростные тренды, которые в дальнейшем могут быть уточнены при помощи томографии.

Ранее было отмечено, что оба горизонта на рис. 2, б, изображенные в виде синей и зеленой кривой, были построены, когда первая граница была реконструирована. Однако чаще всего геофизики-обработчики учитывают ВЧР следующим способом: подбирают скорость замещения, рассчитывают по ней статические поправки и вводят их в данные. Мы рассмотрели такой сценарий – сделав замещение ВЧР статическими поправками, восстановили последнюю границу (красная кривая на рис. 3). Ошибка определения глубины в этом случае оказывается существенно выше, т.е. для модели из рис. 2, а учет ВЧР с помощью модели замещения неприемлем.

Кинематическая сейсмическая томография

Лучевая сейсмическая томография, работающая в модели с пластовой параметризацией, является логическим расширением всей подсистемы построения ГСМ в обобщенной пластовой модели. Она может сочетаться со всеми инструментами построения пластовой модели.

Посредством пластовой лучевой томографии могут решаться несколько практических задач:

- Уточнение построенной толстослоистой глубинно-скоростной модели (ТГСМ) без предположений о ее локальной однородности.
- Привязка к скважинным отбивкам посредством разбиения слоя на стратиграфически согласованные интервалы и отыскания распределения скоростей в каждом из них.
- Учет вертикального градиента скоростей посредством разбиения слоя на стратиграфически согласованные интервалы и поиска ответа в виде линейных функций.
- Возможен учет промежуточных отражений. Посредством применения стратиграфической разбивки пластовую модель можно наделить чертами гибридной параметризации (комбинация горизонтов и сеточной скоростной модели [Jones, 2010]) и контролируемым образом обойти ее внутренние противоречия.

Геофизик по своему усмотрению и в зависимости от решаемой задачи может выбирать, какие слои необходимо обновлять, положения каких горизонтов требуется фиксировать, а какие пласты нужно разбивать на стратиграфически согласованные интервалы для учета имеющихся неоднородностей. Таким образом, томографию можно настраивать как для решения локальной задачи уточнения одного слоя, так и для решения глобальной задачи обновления всей модели.

Определение параметров анизотропии

Помимо учета сложной ВЧР зачастую приходится сталкиваться с полями времен, плохо описываемыми

привычной гиперболой на широком диапазоне удалений, но которые могут быть удобно описаны моделью анизотропии [Thomsen, 1986]. Задача определения параметров анизотропии заключается в отыскании таких значений V_0 , параметров Томсена ϵ и δ , а также пространственной ориентации оси симметрии, которые соответствуют оптимизационному критерию соответствия модели измеренным временам [Анисимов, Лангман, Фиников, 2015, ч. 2]. Ввиду неединственности решения, даже в предположении о локальной однородности пласта, постановка задачи включает в себя требование использования известного глубинного положения отражающего горизонта, поэтому учет анизотропии в ГСМ зачастую является средством привязки сейсмического изображения к скважинным отбивкам.

Для различных практических случаев возможны несколько вариантов постановки и решения данной задачи:

- Задача определения параметров V_0 , ϵ , δ при известной пространственной ориентации оси симметрии как VTI (трансверсально-изотропная среда с вертикальной осью симметрии) или STI (трансверсально-изотропная среда с осью симметрии, ориентированной по нормали к границе), так и произвольно заданной оси (задается в виде карт).
- Задача определения параметров V_0 , ϵ , δ и азимута оси анизотропии для NTI случая (трансверсально-изотропная среда с горизонтальной осью симметрии).
- Задача определения параметров V_0 , ϵ , δ и пространственной ориентации оси симметрии для общего случая TTI (трансверсально-изотропная среда с наклонной осью симметрии).

Все перечисленные варианты задачи могут быть решены посредством численной оптимизации функционала невязки. Алгоритм решения задачи в самой общей постановке был подробно рассмотрен в статье [Анисимов, Лангман, Фиников, 2015, ч. 2]. Сказанное выше касается параметров Томсена, но задача также решается и в терминах квазианизотропных сред (когда эффект от пачки тонких слоев можно описать эффективными параметрами анизотропии [Невский, 1974; Гольдин 2008]).

Параметры анизотропии также можно определять и при помощи лучевой томографии, и, более того, комбинирование анизотропии и стратиграфической разбивки пласта позволяет строить эффективные модели сложных сред, характеризующихся одновременным наличием как слоистости, так и системы трещин. Но при этом не нужно забывать, что томография – это средство для уточнения параметров ГСМ, и каркасные решения должны получаться более грубыми и надежными средствами.

Кинематическая инверсия слоя

Включение в пластовую модель интервалов, характеризующихся анизотропией или вертикальным градиентом скорости, на практике без особой на то причины не производится. Все построения при этом ведутся в локально-однородной изотроп-

ной модели, для определения параметров которой существует уникальный инструмент быстрой кинематической инверсии слоя, позволяющий одновременно определять как глубинное положение отражающего горизонта, так и скоростные характеристики слоя над ним. Помимо этого, решение в локально-однородной изотропной пластовой модели позволяет строить специальный критерий, обеспечивающий проверку гипотезы о локальной однородности слоя, что делает данный инструмент особенно ценным средством построения ГСМ [Glogovsky, Gogonenkov, 1988].

**Расчет статических поправок,
согласованных с построенной ТГСМ**

Последним шагом технологии обычно является расчет статических поправок, согласованных с построенной ТГСМ. Для этого от выбранных в модели горизонтов рассчитываются поля времен, которые служат опорной кинематикой для коррекции высокочастотных статических поправок. Таким образом, качество получаемого изображения может быть повышено за счет адаптации исходных данных к построенной модели.

Выводы. Основные, по нашему мнению, преимущества описанного набора инструментов для построения ГСМ состоят в том, что каждый из них обладает необходимыми методами контроля достоверности, позволяет построить непротиворечивую модель среды (т.е. получаемая модель согласована с той, которая лежит в основе метода) в эффективных параметрах и при этом учесть все принятые в современной обработке факторы, определяющие получение качественных изображений. При этом, следует иметь в виду, что проблемы структурной неустойчивости и некорректности задачи не снимаются в полной мере – результаты, полученные В.М. Глоговским и его соавторами, свидетельствует о том, что неединственность решения обратной задачи не позволяет во многих случаях опираться только на кинематические параметры отраженных волн, даже при построении макромоделли среды [Глоговский и др., 1982]. Можно заменить анизотропный пласт слоистым, а слоистый – градиентным, и получить изображения сходного качества, но с различными структурными и динамическими особенностями. Возможно, лучшим решением для конкретных сейсмогеологических условий является проведение комплекса исследовательских работ, опирающихся на математическое моделирование волновых полей [Каплан и др., 2016]. Только так можно попытаться оценить надежность комплекса процедур, направленных на решение обратных задач сейсморазведки. Эти работы должны опираться на опыт и геофизиков-интерпретаторов, и геологов, хорошо знающих изучаемый район.

Благодарность

Авторы признательны Д.Б. Финикову, О.А. Силаенкову и С.Л. Лангману (ООО «Сейсмостек») за обсуждения и ценные консультации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов Р.Г., Лангман С.Л., Фиников Д.Б. Возможности расширения класса пластовых моделей сред при решении обратной кинематической задачи. Часть 1. Реконструкция пласта. Вставка горизонта // Технологии сейсморазведки. 2015. Т. 12, №2. С. 69–76.
2. Анисимов Р.Г., Лангман С.Л., Фиников Д.Б. Возможности расширения класса пластовых моделей сред при решении обратной кинематической задачи. Часть 2. Реконструкция пласта в модели анизотропии // Технологии сейсморазведки. 2015. Т. 12, №3. С. 37–47.
3. Глоговский В.М., Мешбей В.И., Цейтлин М.И., Лангман С.Л. Кинематико-динамическое преобразование сейсмической записи для определения скоростного и глубинного строения среды // Сборник докладов второго научного семинара стран-членов СЭВ по нефтяной геофизике. Т. 1 (Сейсморазведка). Москва, Россия, 1982. С. 327–331.
4. Глоговский В.М., Лангман С.Л. Свойства решения обратной кинематической задачи сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. 2009. Т. 6, №1. С. 10–17.
5. Гольдин С.В. Сейсмические волны в анизотропных средах. Новосибирск: Сибирское отделение Российской академии наук, 2008. 372 с.
6. Давлетханов Р.Т., Силаенков О.А. Учет влияния ВЧР на основе поверхностносогласованной параметризации годографа отраженной волны // Технологии сейсморазведки. 2016. Т. 13, №3. С. 102–113.
7. Каплан С.А., Лебедев Е.Б., Фиников Д.Б., Шалашиников А.В. Прямые задачи в обработке и интерпретации сейсмических данных // 7-я международная геолого-геофизическая конференция и выставка «Санкт-Петербург 2016. Через интеграцию геонаук – к постижению гармонии недр». Санкт-Петербург, Россия, 11–14 апр. 2016.
8. Лангман С.Л., Силаенков О.А. Кинематико-динамическое преобразование – инструмент параметризации волнового поля // 13-я международная научно-практическая конференция по проблемам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных при геологическом моделировании месторождений углеводородов «Геомодель 2011». Геленджик, Россия, 11–15 сент. 2011.
9. Невский М.В. Квазианизотропия скоростей сейсмических волн. Изд-во «Наука», 1974. 180 с.
10. Glogovsky V.M., Gogonenkov G.N. Study of methods for determining velocity and depth parameters in layered realistic media // Geophysical Transactions. 1988. Vol. 33, no. 3–4. Pp. 157–173.
11. Glogovsky V., Landa E., Langman S., Moser T.J. Validating the velocity model: the Hamburg Score // First Break. – 2009. Mar. Vol. 27, no. 3. Pp. 77–85.
12. Jones I. An Introduction to Velocity Model Building. – EAGE Publications bv, 2010. 296 pp.
13. Thomsen L. Weak elastic anisotropy // Geophysics. – 1986. Oct. Vol. 51, no. 10. Pp. 1954–1966.

REFERENCES

1. Anisimov R.G., Langman S.L., Finikov D.B. Possibilities of extending reservoir models' classes in solution of inverse travelttime problem. Part 1. Layer reconstruction. Insertion of horizon // Seismic Technology. 2015. V. 12, No 2. Pp. 69–76.
2. Anisimov R.G., Langman S.L., Finikov D.B. Possibilities of extending reservoir models' classes in solution of inverse travelttime problem. Part 2. Layer reconstruction in anisotropy model. // Seismic Technology. 2015. V. 12, No 3. Pp. 37–47.
3. Glogovsky V.M., Meshbey V.I., Tseitlin M.I., Langman S.L. Kinematic-dynamical transformation of seismic record for determining of velocity and depth structure of media // Proceedings of the second scientific seminar of the CMEA

member countries in oil geophysics. V. 1 (Seismics). – Moscow, Russia, 1982. Pp. 327–331.

4. *Glogovsky V.M., Langman S.L.* Properties of solving the inverse kinematic seismic problem // *Seismic Technology*. 2009. V. 6, No 1. Pp. 10–17.

5. *Goldin S.V.* Seismic waves in anisotropic medium. – Novosibirsk: Siberian department of the Russian Academy of Sciences, 2008. 372 pp.

6. *Davletkhanov R.T., Silaenkov O.A.* Near-surface impact accounting based on surface-consistent parametrization of hodograph of reflected wave // *Seismic Technology*. 2016. V. 13, No 3. Pp. 102–113.

7. *Kaplan S.A., Lebedev E.B., Finikov D.B., Shalashnikov A.V.* Direct problems in seismic data processing and interpretation // 7th international geological and geophysical conference and exhibition «St. Petersburg 2016. Through the integration of geosciences – to comprehension of harmony of bowels». – St. Petersburg, Russia, 11–14 Apr 2016.

8. *Langman S.L., Silaenkov O.A.* Kinematic-dynamical transformation – the mean of wavefield parametrization // 13th EAGE science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development «Geomodel 2011». – Gelendzhik, Russia, 11–15 Sep 2011.

9. *Nevsky M.V.* Quazianisotropy of seismic waves velocities. – Izd-vo «Nauka», 1974. 180 pp.

10. *Glogovsky V.M., Gogonenkov G.N.* Study of methods for determining velocity and depth parameters in layered realistic media // *Geophysical Transactions*. 1988. Vol. 33, no. 3–4. Pp. 157–173.

11. *Glogovsky V., Landa E., Langman S., Moser T.J.* Validating the velocity model: the Hamburg Score // *First Break*. 2009. Mar. Vol. 27, no. 3. Pp. 77–85.

12. *Jones I.* An Introduction to Velocity Model Building. – EAGE Publications bv, 2010. 296 pp.

13. *Thomsen L.* Weak elastic anisotropy // *Geophysics*. 1986. Oct. Vol. 51, no. 10. Pp. 1954–1966.

РЕЦЕНЗЕНТ – доктор физико-математических наук
М.С. Денисов

ОБ АВТОРАХ



АНИСИМОВ
Руслан Гурьевич

Аспирант кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем геологического факультета Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И.М. Губкина. Ведущий программист департамента разработки алгоритмического и программного обеспечения ООО «Сейсмотек».



ДАВЛЕТХАНОВ
Ришат Талгатович

Аспирант кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Геофизик департамента интерпретационной обработки сейсмических данных ООО «Сейсмотек».