

**Отзыв официального оппонента**  
на диссертационную работу **Конькова Андрея Игоревича**  
«Разработка и экспериментальная апробация метода когерентной малоглубинной сейсмоакустической диагностики на основе поверхностных волн»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика

Работа Конькова А.И. посвящена актуальной теме развития методов динамического анализа данных поверхностных волн для построения слоистой упругой модели. Следует отметить, что использование поверхностных волн в рамках сейсмических методов в настоящее время переживает бурное развитие. В сейсмологии это связано с резким ростом объемов данных по поверхностным волнам в связи с массовым использованием кросс-корреляционных методов обработки данных сейсмологических сетей (так называемая сейсмическая «интерферометрия»). Этот метод обработки позволяет строить записи поверхностных волн на основе данных сейсмического шума, т.е. не требует наличия сейсмического источника. В сейсморазведке анализ поверхностных волн все чаще используется при обработке в связи с необходимостью проводить исследования в районах со сложным строением верхней части разреза (например, в Восточной Сибири). В этом случае при обработке не удастся ограничиться стандартными подходами введения статических поправок, а придется достаточно детально строить модель верхней части разреза, чтобы потом корректно скомпенсировать ее влияние при построении сейсмических разрезов для целевых горизонтов. Ну и конечно, важной прикладной областью является малоглубинная сейсмика, в которой анализ поверхностных волн можно считать устоявшимся подходом, но постоянно расширяется круг решаемых прикладных задач (изыскания при строительстве, изучение и мониторинг устойчивости склонов, объектов инфраструктуры, деградации мерзлоты, разработки твердых полезных ископаемых и т.д.).

При таком заметном росте популярности метода анализа поверхностных волн в сейсмических исследованиях важной задачей является повышение его информативности. В то же время, теоретическое развитие метода заметно отстает от нужд практики. Так, основным подходом к обработке данных является метод спектрального анализа поверхностных волн (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW), вошедший в практику в конце 80-х годов прошлого века. При этом хорошо известно, что этот стандартный метод обработки, основанный на анализе дисперсионной кривой волн Релея, мало чувствителен к скоростям продольных волн. Фактически для его успешного применения необходимо иметь априорную информацию о продольных скоростях или отношении скоростей продольных и поперечных волн.

В то же время с теоретической точки зрения задача определения упругих свойств по сейсмическим данным не является бесперспективной. Так еще в 60-х годах прошлого века [Алексеев А.С., Известия АН СССР. Сер. Геофиз. 1962 №11. 1514-1522] была показана единственность решения обратной динамической задачи восстановления коэффициентов уравнения упругости по наблюдениям упругого волнового поля на поверхности. Однако эта задача оказалась неустойчивой в присутствии шумов, так что на практике использовать эти результаты в полной мере не удастся. В работах Маркушевича В.М. ставилась теоретическая задача определения упругих свойств полупространства по поверхностным волнам Релея. Вычислительные подходы к восстановлению скоростей Р- и S-волн по данным поверхностных волн разрабатывались в работах [Загорский Л.С., Шкуратник В.Л., Акустический журнал, 2013, т. 59, № 2, 222-231; Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Загорский Д.Л., Горный информационно-

аналитический бюллетень, 2014, № 8, 187-191], но практические результаты удалось получить пока только для разреза поперечных волн.

В связи с рассматриваемой диссертацией интересно упомянуть так называемый метод Накамуры [Nakamura Y.A., QR RTRI, v. 30, 1989. P. 25-33], который используется в работах по сейсмическому микрорайонированию для расчета локальных усилений грунтов относительно базовых оценок сейсмической интенсивности. Этот метод основан на эмпирических наблюдениях и использует отношение спектров вертикальной к горизонтальной компонент записей сейсмометра. В этой связи работа Конькова А.И. является дальнейшим развитием этой идеи в сторону количественной оценки упругих параметров (P- и S-волн) по данным поверхностных волн.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Во введении сформулированы цель исследования, актуальность, защищаемые научные результаты, личный вклад соискателя и т.д.

В главе 1 приводится теоретическое обоснование нового метода анализа данных поверхностных волн для определения скоростей P- и S-волн (далее PASW). В главе получен ряд результатов, которые являются подготовительными или обосновывают новый метод спектрального анализа поверхностных волн. Так, было рассмотрено аналитическое решение эталонной задачи о распространении нормальных волн в среде, которая состоит из упругого слоя, лежащего на слое жидкости, покрывающем упругое полупространство. Для этой задачи показано, что отношение горизонтальной и вертикальной компонент вектора смещения позволяет расширить возможности определения упругих параметров слоистых сред за счет большей чувствительности (порядка 3 %) к скоростям продольных волн. Представлен приближенный метод построения профиля скоростей волн Релея от глубины, который может служить в качестве начального приближения для дальнейшего уточнения скоростей продольных и поперечных волн (а значит, и коэффициента Пуассона) в слоистой модели. В последующих главах проводится апробация предложенного метода на данных натуральных экспериментов.

В главе 2 приводятся результаты применения предложенного метода при решении специфической задачи изучения вариаций водонасыщения грунтов по данным поверхностных волн. Для оценки скорости сдвиговой волны и коэффициента Пуассона решалась обратная задача в оптимизационной постановке, в которой производился подбор дисперсионной кривой волн Релея и кривой отношения вертикальной к горизонтальной компоненте вектора смещений. Натурные эксперименты производились на сейсмоакустическом полигоне ИПФ РАН «Безводное» для случая естественных (разные сезоны) и искусственных вариаций уровня грунтовых вод. По результатам анализа данных были построены разрезы продольных и поперечных волн. Проводились эксперименты с контролируемым водонасыщением (полив в поверхности) и исследования механоакустических свойств дисперсного грунта и его неустойчивости при насыщении жидкостью (заглубленный шланг). В результате решения обратной задачи был определен характер изменений модуля сдвига и коэффициента Пуассона с течением времени в объеме грунта в процессе его водонасыщения.

В главе 3 приводятся примеры использования метода при решении инженерных (исследование устойчивости склонов) и археологических задач (исследование территории будущих раскопок). Проведена пробная работа по диагностике оползнеопасности склона, основанная на сравнении частотных характеристик волны Рэлея (фазовой скорости и отношения амплитуд компонент вектора смещения) в разных направлениях - вдоль склона и поперек него. Полученная разница скоростей интерпретировалась, как сейсмическая анизотропия, порожденная системой упорядоченных трещин. Также проведена пробная работа по применению предложенного метода PASW для решения задачи оконтуривания

археологических площадок при условии малого акустического контраста неоднородностей.

Заключение содержит перечисление основных результатов работы и перспективы дальнейшего развития и применения метода.

Оценивая работу в целом, следует отметить, что новизна и научная значимость защищаемых положений не вызывают сомнений. Для обоснования предложенного метода спектрального анализа данных поверхностных волн рассмотрен целый ряд эталонных задач, имеющих известное точное или асимптотическое решение. Достоверность полученных теоретических подтверждается тестированием на реальных данных целого ряда натуральных экспериментов.

Есть ряд замечаний по изложению результатов работы в диссертации.

Основное общее замечание по работе состоит в том, что в тексте нет приведенного в одном месте пошагового описания самого важного результата - предлагаемого нового метода обработки поверхностных волн PASW. Я ожидал бы увидеть его в Главе 1, но там, главным образом, приводится мотивировочная часть и только в одном абзаце на стр. 53 есть какие-то общие слова про сам метод, из которых понять что-то очень сложно. Важная формулировка оптимизационной постановки обратной задачи потом возникает среди текста на стр. 57 в главе по применению метода.

Можно сделать ряд замечаний по формулировкам защищаемых положений. Так, в первом защищаемом положении формулировка «...позволяет реконструировать распределение коэффициента Пуассона по глубине...» является слишком узкой, т.к. предлагаемый подход позволяет восстанавливать оба упругих модуля, а возможность восстанавливать коэффициент Пуассона является лишь следствием. Для правильного изложения следовало бы написать «позволяет реконструировать распределение скоростей продольных и сдвиговых волн (а значит и коэффициента Пуассона) по глубине...». Для второго защищаемого положения не очень понятно уточнение про отсутствие критических частот. Это утверждение фактически на раскрывается в основном тексте. Если оно действительно важно, то эта тема должна была быть поднята в обзоре и как-то акцентирована в основном тексте. В третьем защищаемом положении вообще нет упоминания про анизотропию, зато напрямую говорится про объемное содержание трещин. Это слишком сильное утверждение, т.к. сейсмическая анизотропия является лишь косвенным признаком трещиноватости (а может быть вызвана и другими факторами). В разведочной геофизике прикладывается много усилий к тому, чтобы понять и обосновать связи между анизотропией и упорядоченной трещиноватостью консолидированных пород в рамках геомеханических процессов их разрушения. Замечу, что в этом случае используется постоянно растущий объем прямых визуальных наблюдений трещиноватости на стенках скважины по данным пластовых микросканеров. Напрямую переносить получаемые таким образом связи на случай механики оползней и неконсолидированные грунты вряд ли возможно. Я бы предложил использовать более консервативную формулировку типа «Разработанный метод позволяет решать задачи дистанционной сейсмоакустической диагностики и мониторинга свойств верхнего слоя земных пород, включая сейсмическую анизотропию и локализацию неоднородностей малого акустического контраста.» Далее можно перечислить возможные приложения, если есть желание.

Есть ряд замечаний по изложению результатов работы. Так, в работе предложен новый метод спектрального анализа поверхностных волн, основанный на совместном анализе дисперсионной кривой, отвечающей фундаментальной моде волны Рэлея, и частотной зависимости отношения вертикальной и горизонтальной компонент вектора смещения волны Рэлея. Стоит отметить, что при разработке геофизического метода, имеющего практическую значимость, принято не только более четко формулировать граф

обработки (уже упоминалось ранее), но и проводить более детальное исследование устойчивости к шумам и области неединственности решения обратной задачи восстановления упругих параметров. В работе показана принципиальная чувствительность данных к интересующим параметрам, но это только часть тестирования метода. Потом следовало бы создать набор реалистичных моделей для планируемых приложений и исследовать наличие локальных минимумов функционала невязки, зависимость от начального приближения, устойчивость к ошибкам в данных и т.д. Именно этот анализ придает вес предлагаемым методам с точки зрения геофизических приложений.

В работе показана возможность дистанционной диагностики наличия водоносного слоя и определения его мощности и глубины. Опять же в работе не приводится конкретный граф анализа данных, чтобы получить оценку толщины слоя воды. В работе только приводятся рассуждения, обосновывающие возможность такой оценки. После этого надо написать конкретные операции: построить спектры такой-то компоненты, по ним сделать то-то и то-то...

Почему в теоретическом анализе используется модель слоя воды, а результаты используются для влагонасыщенных грунтов? Такая увязка должна быть как-то обоснована, т.к. все-таки в земле нет слоев чистой воды. Существуют ли ссылки или соображения, обосновывающие возможность нулевого коэффициента Пуассона для грунтов? Я таких значений не встречал. Отмечу, что я бы видел применение данного результата не при изучении грунтов, а при исследовании мощности ледового покрова акваторий. Например, при проведении сейсморазведки на арктическом мелководье возникают серьезные проблемы, связанные с очень сильными поверхностными волнами.

В работе неоднократно сказано, что применение разработанного метода PASW позволяет строить распределение упругих параметров с глубиной и определять объемную концентрацию трещин при изучении устойчивости склонов. Однако автор не привел собственно расчетов концентрации трещин. Почему в этом примере нет определения собственно скоростей P- и S-волн? Что помешало сделать эти оценки и можно ли говорить о возможности количественной оценке параметров анизотропии, что будет необходимо для оценки концентрации трещин (даже если предположить применимость теорий, развитых для консолидированных трещиноватых пород)?

В работе утверждается, что метод PASW успешно опробован при картировании пространственного распределения объемных неоднородностей малого сейсмоакустического контраста на примере археологических объектов. Указано, что результаты реконструкции подтверждены сравнением с результатами применения неакустических методов диагностики земных пород и археологическими раскопками. Эти общие утверждения мне не кажутся обоснованными в работе. Чтобы это не было общим утверждением, необходимо конкретно указать соответствие объектов и аномалий, чтобы это выглядело убедительно. Почему на рис. 37 указан атрибут (отношение вертикальной к горизонтальной компоненте), а не скорости? Как это соотносится с применением метода PASW? Большинство аномалий на рис. 37 выглядят, как артефакты системы наблюдений – вытянуты вдоль профиля (вертикально) и резко меняются между профилями (горизонтально). Это может говорить о неустойчивости используемого атрибута из-за различий в источнике или других причин. Для проверки можно было бы провести альтернативные измерения в ортогональном направлении (профили в горизонтальном направлении), чтобы проверить степень неединственности. По сравнению с электроразведкой также нет конкретики. Сам автор делает противоречивые утверждения на эту тему. Так, на стр. 89 он пишет о схожести результатов («... Стоит отметить корреляцию полученных данных как с результатами электроразведки, так и ...»), а на стр. 90 о различии («... В условиях данной археологической площадки стандартные методы практически не позволили выявить наличие «перспективных» неоднородностей...»).

Также при обработке реальных данных не хватает обсуждения качества подбора данных. Во всех случаях реальных данных необходимо было бы привести рисунки с наложением реальных данных и подобранных синтетических кривых. Важно было бы обсудить степени неединственности получаемых результатов, т.е. какие альтернативные модели позволяют подобрать данные с похожим уровнем детальности.

Отмечу ряд мелких замечаний. В обзорную часть можно было поставить больше работ по малоглубинным сейсмическим источникам, а также упомянуть работы Загорского, Шкуратника. Следовало бы пронумеровать все формулы для удобства рецензирования. Не все математические символы определены в тексте. В тексте есть два рисунка 12.

Приведенные выше замечания относятся к оформлению и точности формулировок работы и не умаляют научной значимости результатов, представленных соискателем. Полученные результаты могут быть полезны во многих практически значимых приложениях. Некоторые из них были перечислены автором в Заключение. К ним я бы еще добавил возможное применение предложенного метода при изучении верхней части разреза в сейсморазведочных задачах и в сейсмологии. Замечу, что в обоих приложениях уже массово используются системы наблюдений с трехкомпонентной записью, что является критическим для применения разработанного метода.

Основные результаты диссертации отражены в 24 работах автора, из которых 5 опубликованы в профильных периодических научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ для публикации основных результатов докторских и кандидатских диссертаций. Автореферат достаточно полно представляет содержание диссертации.

Исходя из всего вышесказанного, диссертационная работа Конькова Андрея Игоревича «Разработка и экспериментальная апробация метода когерентной малоглубинной сейсмоакустической диагностики на основе поверхностных волн» отвечает критериям п. 9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а её автор Коньков Андрей Игоревич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06, «акустика».

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией динамических проблем сейсмологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), кандидат физико-математических наук  
13 июня 2016 г.

Антон Альбертович Дучков



Почтовый адрес:  
630090, г. Новосибирск,  
проспект Академика Коптюга, д. 3,  
тел. +7(383) 363-6714,  
e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

подпись А.А. Дучкова заверяю  
Учёный секретарь ИНГГ СО РАН,  
кандидат геолого-минералогических наук



А.М. Санчаев