

### **8.5. ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ СЕЙСМИКИ. ШКОЛА С.В. ГОЛЬДИНА (история лаборатории)**

---

*Т.В. Нефёдкина, Л.Г. Киселёва*

В 1970 г. в Институте геологии и геофизики СО АН СССР была создана новая лаборатория математических методов в геофизике. Ее возглавил приглашенный из Тюмени канд. физ.-мат. наук Сергей Васильевич Гольдин. Круг его научных интересов в те годы — обнаружение и корреляция сейсмических волн, анализ интерференционных систем, цифровая фильтрация сейсмограмм, спектрально-статистический метод, теория многоступенчатых алгоритмов и др. — был сосредоточен в области приложения методов математической статистики к задачам геологии и геофизики.

Все сотрудники лаборатории были тогда молоды. Самый старший — Эрик Васильевич Никольский (из школы Георгия Ивановича Петрашеня), остальные — преимущественно выпускники НГУ: Лидия Григорьевна Киселёва, Людмила Степановна Куликова, Владимир Ильич Штивельман, Владимир С. Баранов, Нина Сергеевна Стаканова, Георгий Михайлович Митрофанов, Владимир Георгиевич Черняков, Татьяна Владимировна Курдюкова (перечислены в порядке выпусков). Позднее — Александр Витальевич Окольский.

В середине 70-х годов в лаборатории успешно развивался спектрально-статистический метод (ССМ), предложенный С.В. Гольдиным и его учеником Г.М. Митрофановым. Идея ССМ была весьма проста: факторная модель,



описывающая влияние различных факторов (ОГТ, приемник, источник, удаление) в спектральной области с логарифмической зависимостью с точностью до изоморфизма, оказывается такой же, как и в задаче коррекции статических поправок. Соответствующие алгоритмы могли быть использованы для обработки сейсмограмм после логарифмирования их комплексных спектров. Изучение вероятностных распределений логарифмов комплексных спектров позволило впоследствии Г.М. Митрофанову построить эффективный способ продолжения фазовых спектров, что обусловило эффективность всего метода. Было показано, что метод ССМ позволяет решать весьма сложные задачи, связанные с оценкой динамики волн по сейсмограммам. В частности, показана симметричность динамического годографа ОГТ, что подтвердило справедливость динамического принципа взаимности. В 1984 г. по результатам этих исследований Г.М. Митрофанов защитил кандидатскую диссертацию.

Постепенно научные интересы С.В. Гольдина сместились в область кинематических задач геометрической сейсмологии, как прямых, так и обратных. В лаборатории стали разрабатываться соответствующая теория и алгоритмы.

Уже начиная с 1973 г. в Сибирской геофизической экспедиции Миннефтепрома совместно с коллективом под руководством С.В. Гольдина разрабатывался пакет программ кинематической интерпретации для сложно-построенных двумерных сред. Этому пакету Сергей Васильевич сразу дал броское и несколько вызывающее название «КИНГ» (король), на самом деле точно отражающее его сущность — кинематическая интерпретация годографов. В первоначальных версиях системы КИНГ оценивались структурные и скоростные параметры слоисто-неоднородных двумерных моделей сред с криволинейными границами. При этом использовались годографы только отраженных продольных и поперечных волн. Затем они пополнились алгоритмами обработки обменных и кратных волн с произвольным кодом. Система предназначалась также для численного моделирования: расчетов теоретических годографов и эффективных параметров с учетом или без учета помех.

В теоретическом плане отличительной особенностью системы КИНГ было органическое сочетание оптимизационных и итерационных методов решения обратных задач инверсного типа. При инверсии минимизировалась целевая функция (имеющая часто овражный вид) путем целенаправленного перебора параметров среды. Алгоритмы инверсного типа реализуют явные формулы решения обратной задачи. С.В. Гольдин и его сотрудники внесли значительный вклад и во внедрение методов оптимизации в практику цифровой обработки сейсмических данных. Он ввел понятие сцепленных переменных, благодаря чему удалось усовершенствовать стратегию поиска минимума целевой функции в овражных ситуациях.

В разработке системы КИНГ принимало участие большое число специалистов: Владимир Степанович Черняк, Дориан Израйлевич Судварг, Сергей Алексеевич Гриценко, Л.Г. Киселёва, Т.В. Курдюкова, Ирина Анатольевна Малиновская, Алексей Фёдорович Глебов, Павел Викторович Храпов, Игорь Сергеевич Шеломов, В.Г. Черняков, Ольга И. Грозина, Дмитрий Борисович Поляков, А.Н. Шеметова, Константин Николаевич Зверинский и др. Совместная работа была счастливой не только в творческом, но и в чисто человеческом плане. Мы часто собирались и с энтузиазмом обсуждали отдельные узлы системы, наши удачи и неудачи.

Сотрудники лаборатории (Л.Г. Киселёва, Т.В. Курдюкова) дополнили систему КИНГ программами обработки преломленных волн, в первую очередь прямых — из источника — и головных — для сред с криволинейными границами, а также рефрагированных волн. Были исследованы возможности метода оптимизации при совместной обработке отраженных и преломленных волн (что давало возможность обрабатывать также материалы КМПВ и ГСЗ). Для этого необходимо было изучить вопрос единственности решения обратной кинематической задачи для головных волн и разработать алгоритм оценки средней скорости в покрывающей среде по встречным годографам головных волн (С.В. Гольдин, Л.Г. Киселёва). Новый приближенный способ определения средней скорости был основан на нахождении базы сопряженных точек с использованием вторых производных встречных годографов головных волн.

Решения тех или иных задач по определению параметров среды системой КИНГ стали темами диссертаций В.С. Черняка, Д.И. Судварга, Л.Г. Киселёвой, В.Г. Чернякова, Т.В. Курдюковой, Владимира Геннадьевича Пашкова и др., а также многих дипломных работ студентов-геофизиков НГУ под руководством С.В. Гольдина.

В середине 80-х годов в СибГЭ Миннефтепрома СССР под руководством Сергея Васильевича был разработан пакет трехмерной кинематической интерпретации SPASE.

Первые версии пакета КИНГ создавались для ЭЦВМ БЭСМ-6, а с 1986 г. расширенная система переводилась на ЭВМ серии ЕС. БЭСМ-6 тогда была в Вычислительном центре СО АН. В любую погоду несколько раз в день, включая субботу и воскресенье, мы (пользователи) ходили туда, сдавая колоды перфокарт и получая простыни с выдачей, отлаживая программы или обрабатывая материал.

Система КИНГ опробовалась на полевых сейсмических материалах в лаборатории глубинного сейсмического зондирования и других лаборатори-



Сергей Васильевич в кругу учеников и сотрудников лаборатории, 1986 г. Стоят (слева направо): Т.В. Нефёдкина, В.Г. Черняков, П.В. Храпов, А.В. Окольский, Г.К. Заикина, М.Е. Кротов, С.В. Гольдин, Н.П. Шмельова, ..., В.А. Белкина, С.А. Гриценко, В.М. Вингалов, В.В. Устюжанин. Сидят: Л.Г. Киселёва, Д.И. Судварг



ях ИГиГ и СибГЭ. Пакет прикладных программ расширенной системы кинематической интерпретации годографов «КИНГ» участвовал в конкурсе прикладных работ в СО АН СССР в 1988 г. Министерство геологии РСФСР рекомендовало ее для внедрения в производственные организации. Многие годы пакеты КИНГ успешно применялись при обработке сейсмических материалов Западной и Восточной Сибири (ПГО «Иркутскгеофизика» и «Енисейгеофизика»).

Первым ответственным испытанием расширенной преломленными волнами системы КИНГ была интерпретация 12-километрового профиля ВЛЭПП (пос. Ключи Новосибирской области), выполненного по методу КМПВ при трехлинейной установке приемников, с целью инженерных изысканий места для линейного ускорителя, который собирался строить Институт ядерной физики. Для профиля, располагавшегося в Кольвань-Томской складчатой зоне, была характерна тонкослоистость разреза и малая скоростная дифференциация среды по поперечным волнам. В такой ситуации было интересно использовать систему КИНГ для независимой обработки монотипных (продольных и поперечных) и обменных волн. Особенностью местоположения профиля были многочисленные овраги с колебаниями рельефа по вертикали до 20–30 м на 200–300 м по горизонтали и неглубоко залегающий фундамент (первые сотни метров). В задачу интерпретации входило построение поверхности палеозойского фундамента, промежуточных границ и изучение скоростной характеристики района. Обработка преломленных волн разных типов позволила провести интерпретацию в сложной многослойной среде с криволинейными границами и сильно пересеченным рельефом. Используя наряду с продольными обменные и поперечные волны, мы получили дополнительную информацию о скоростных параметрах среды. Удалось также проследить еще одну границу внутри коры выветривания, не выделенную по продольным волнам.

Успешную проверку система КИНГ прошла и на международном тесте ГСЗ. В 1975 г. группа советских, чехословацких и западногерманских геофизиков разработала тестовую модель земной коры в современном на то время представлении о ее структуре. Эта модель включала значительные вертикальные и горизонтальные неоднородности, в том числе неярко выраженный волновод. Тест рассылался в геофизические организации, занимающиеся обработкой ГСЗ, для сравнения различных алгоритмов решения обратных кинематических задач. Сергей Васильевич не мог, конечно, устоять перед искушением обработать тестовые данные с помощью нашей системы.

Исходными данными служили синтетические сейсмограммы, рассчитанные лучевым методом и содержащие отраженные, рефрагированные и головные волны. По выделенным годографам волн был построен разрез, содержащий три границы: кровля фундамента, внутрикоровая  $K$  и граница Мохоровичича  $M$ . Также в верхней части коры был выделен волновод, параметры которого можно было оценить только ориентировочно. Сопоставление тестовой модели с полученным разрезом показало, что глубины границ  $K$  и  $M$  определены с точностью 3,5 и 1,5 % соответственно. Интервальные и граничные скорости также были определены с удовлетворительной точностью. С бóльшей погрешностью (для скорости — до 10 %) определены параметры верхней части разреза, освещенной рефрагированными волнами. Отчасти это объяснялось закруглением модели среды, а также явно недостаточной плотностью системы наблюдения для восстановления строения подобных сложных сред.



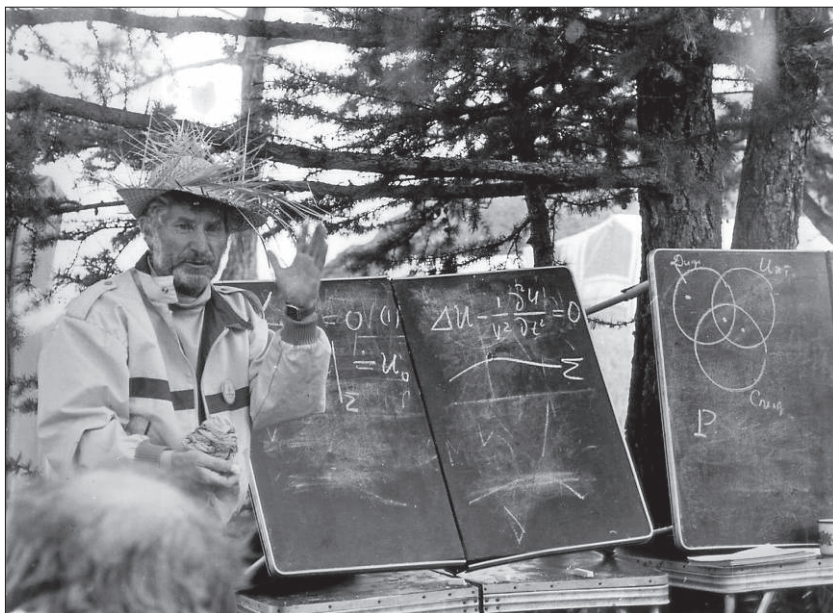
Гуцульщина. Летняя школа в Вижнице. Украина, 1989 г.

Опыт применения пакета КИНГ в различных сейсмогеологических условиях, а также изложенный с максимальной доступностью обширный фрагмент теории кинематической интерпретации был подытожен в книге С.В. Гольдина, Л.Г. Киселёвой, В.Г. Пашкова, В.С. Черняка «Двумерная кинематическая интерпретация сейсмограмм в слоистых средах» (Новосибирск: Наука, 1993).

12 января 1983 г. на заседании секции геофизики ученого совета ИГиГ Сергей Васильевич выступил с предложением о создании семинара по математическим методам геофизики. Обоснованием являлись: важность работы по развитию математических методов моделирования и интерпретации геофизических работ; наличие межлабораторных тем, связанных с интенсивным использованием математических методов и нуждающихся в выработке единого методологического подхода. Семинар был создан, и долгие годы его бессменным председателем был Сергей Васильевич.

В 1985 г. С.В. Гольдин организовал летнюю школу-семинар для молодых специалистов. В течение шести лет ежегодно на них собирались десятки специалистов-геофизиков из разных областей Советского Союза: от Дальнего Востока до Карпат и от Мурманска до Средней Азии. Только известные финансовые трудности времен перестройки прекратили эти незабываемые школы. Первая из них прошла на оз. Байкал на базе ПГО «Иркутскгеофизика». Семинары и летние школы посещали также студенты НГУ и аспиранты. Именно тогда зародилась новосибирская геофизическая школа, созданная во многом трудами Сергея Васильевича и получившая позднее всемирную





С.В. Гольдин на летней школе. Байкал, 1988 г.

известность. Аспиранты С.В. Гольдина, как правило, защищали замечательные работы. В число ведущих специалистов мировой геофизики вошли окончившие в разное время НГУ Евгений Ланда, Владимир Гречка, Сергей Фомель, Антон Дучков. Премии Карчера, присуждаемой Обществом разведочной геофизики молодым геофизикам до 33 лет за выдающийся вклад в науку, в 1998 г. удостоен В. Гречка, а в 2001 г. — С. Фомель.

Летние школы всегда отличала веселая неформальная обстановка. На заседаниях можно было присутствовать не только без «галстуков», но и просто в купальниках, если была подходящая погода. Это же относилось и к самим выступающим. Где-нибудь на поляне устанавливалась школьная доска (иногда столешница), и это был необходимый минимум обстановки. Вечером непременно костер, разговоры, стихи, песни под гитару Аркадия Мадатова и мандолину Сергея Васильевича. В свободное время организовывались экскурсии по близлежащим достопримечательностям.

В 1989 г. на базе отделения геофизики ИГиГ СО АН СССР был создан самостоятельный Институт геофизики СО РАН. В период реорганизации обновлялся состав лабораторий, чему способствовало объявление «Юрьева дня» с разрешением перехода сотрудников из одной лаборатории в другую. В это время С.В. Гольдин принял решение уйти с поста заведующего лабораторией и более плотно заняться научной работой. Он предложил на вакантное место заведующего кандидатуру своего ученика Г.М. Митрофанова, оставляя за собой общее научное руководство. В это же время в лабораторию перешли к.г.-м.н. Татьяна Викторовна Нефёдкина и старший лаборант Наталья Георгиевна Костюк, ранее работавшие в лаборатории многоволновой сейсморазведки. Также сменилось название лаборатории на лабораторию прямых и обратных задач сейсмологии.

В начале 90-х годов С.В. Гольдин усиленно занимался развитием теории миграции сейсмических волн. Им была разработана теория миграции обмен-

ных и монотипных волн в истинных амплитудах, основанная на миграции Кирхгофа. Миграция в истинных амплитудах заключается в построении такого изображения среды, в котором интенсивность (яркость) отражателя пропорциональна коэффициенту отражения. Миграционный оператор представляется в виде произведения оператора разновременного суммирования со специально выбранной весовой функцией и корректирующих фильтров. В лаборатории была организована группа (с.н.с. Т.В. Нефёдкина, аспирант С.Б. Фомель, инженер Борис Берхин), занимавшаяся созданием соответствующих алгоритмов и компьютерных программ. Первый вариант программы для простой модели был разработан в 1992 г., и результаты ее опробования на модельных данных докладывались на Российско-норвежском семинаре по нефтяной геофизике, проходившем в 1993 г. на Байкале. Непосредственно к этому направлению примыкают очень важные результаты, полученные С.Б. Фомелем, — построение уравнения, позволяющего осуществлять ДМО-преобразование сейсмограмм непрерывным продолжением по удалениям, а также временную миграцию продолжением по значениям скорости.

Параллельно в лаборатории велись научные исследования по следующим направлениям:

- развитие метода сейсмической декомпозиции волнового поля с целью восстановления параметров поглощения и затухания сейсмических волн. Динамический анализ многоканальных сейсмограмм на основе аппроксимационного подхода (Г.М. Митрофанов);

- трассировка сейсмических лучей и расчет волновых полей на основе асимптотических методов для сложнопостроенных блочных сред (Т.В. Курдюкова, В.Г. Черняков);

- разработка оптимизационного метода оценки параметров полей времен произвольной сложности. Интерпретация негиперболических годографов. Получены общие соотношения для конструирования операторов анализа, позволяющих существенно увеличить быстродействие известных универсальных алгоритмов оптимизации (В.Г. Черняков);

- построение оптимальных разностных схем для волнового уравнения с использованием теоремы Котельникова. Создание программ по расчету волновых полей для вертикально-неоднородных сред, содержащих более 1000 слоев (А.В. Окольский, Николай Иванович Коптяев).

Второе и третье направления были традиционными для лаборатории и являлись продолжением работ по созданию и совершенствованию алгоритмов кинематической интерпретации отраженных и преломленных волн. Результаты, полученные по первому направлению, создали предпосылки для перехода к решению обратных динамических задач.

В эти годы заметно расширились международные связи лаборатории. Результаты научных исследований докладывались на ежегодных международных конференциях SEG, EAGE, EAGO, на международных геофизических конгрессах в Бразилии. При непосредственном участии сотрудников лаборатории были организованы и проведены три международных семинара по нефтяным исследованиям совместно с норвежскими геофизиками: г. Мурманск (1991), г. Восс (Норвегия, 1992), оз. Байкал (1993).

В середине 90-х годов С.В. Гольдиным получены фундаментальные теоретические результаты в области сейсмической томографии. Для преобразования Радона в полосе исследована проблема единственности, существования и устойчивости решения. Доказаны конструктивные теоремы единственности для отражательной томографии, исследован алгоритм по-



полнения томографических данных по методу близких операторов. Эти теоретические исследования легли в основу алгоритмов сейсмической томографии, которые развивались в лаборатории в последующие годы.

Во второй половине 90-х годов в лаборатории начинают развиваться методы решения обратных динамических задач. Существенное продвижение было получено в двух направлениях: методы Прони-фильтрации и многоволнового AVO-анализа.

Метод Прони-фильтрации был разработан Г.М. Митрофановым в 1996 г. на основе преобразования Прони, заключающегося в разложении сигналов в последовательность затухающих экспонент. Каждая из таких экспонент определяется четырьмя действительными параметрами: амплитудой, затуханием, частотой и фазой. В методике Прони-фильтрации производится селекция по всем четырем параметрам. При этом ключевыми являются частота и затухание. Результат фильтрации сейсмических данных может быть представлен в виде стандартных временных разрезов на высоких частотах, характеризующихся повышенным разрешением сигналов. На них могут быть выделены зоны с аномальными значениями поглощения энергии сейсмических колебаний, которые интерпретируются как зоны трещиноватого нефте- или газонасыщенного коллектора. Разработанный алгоритм Прони-фильтрации и пакет программ прошли тестирование на большом числе математических и физических моделей (Юрий Анатольевич Орлов, Ираида Фаисовна Рахменкулова) и впоследствии широко применялись при обработке реальных сейсмических данных, полученных в Сибири и Китае (Т.В. Нефёдкина, Г.М. Митрофанов).

Метод многоволнового AVO-анализа был предложен Т.В. Нефёдкиной в 1998 г. и на протяжении многих лет развивался ею вместе с учениками. Она получила приближенное выражение для коэффициента отражения обменной  $PS$ -волны в предположении малой контрастности отражающей границы (аналог аппроксимации R.T. Shuey для коэффициента отражения продольной волны). Это позволило разработать алгоритм AVO-анализа комплекса продольных и обменных волн, который обеспечивал устойчивое определение упругих параметров в изотропной среде. В этой работе принимали участие Т.В. Курдюкова и студент 4-го курса НГУ Вадим Владимирович Бузлуков.

В дальнейшем методика многоволнового AVO-анализа была развита и для модели тонкослоистой среды. Был разработан алгоритм многоволновой AVO-инверсии для тонкослоистых пачек, основанный на комплексном использовании оптимизационных методов и итерационного R-алгоритма, позволяющего подавить смещение оценок параметров тонких слоев. В качестве входных данных использовались спектральные характеристики отражения продольных и обменных волн от тонкослоистой пачки. При конструировании целевой функции применяли как приближенные линеаризованные, так и точные выражения для частотных характеристик отражения продольных и обменных волн. Предлагаемая методика была опробована на модельных и реальных сейсмических данных, зарегистрированных на Южно-Киняминском нефтяном месторождении в Западной Сибири. По этой тематике В.В. Бузлуковым в 2000 г. была защищена магистерская работа (науч. руководитель Т.В. Нефёдкина) и в 2006 г. подготовлена к защите кандидатская диссертация (науч. руководитель С.В. Гольдин).

Коллектив лаборатории постоянно пополнялся талантливыми студентами НГУ, выполнявшими здесь свои бакалаврские и магистерские работы, а в дальнейшем становившимися аспирантами и научными сотрудниками.



В 1995 г. в лабораторию пришел один из лучших учеников С.В. Гольдина Антон Альбертович Дучков. В студенческие годы он выполнял исследования следующих за нулевым приближений лучевого ряда. После окончания магистратуры в 1998 г. А.А. Дучков поступил в аспирантуру, где занимался описанием сейсмического волнового поля в зонах многолучевости, т. е. вблизи каустик. На основе интегрального представления волнового поля кирхгофского типа и теории геометрической сейсмоки во временной области им были выведены интегральные формулы переходной асимптотики, дающие описание волнового поля в окрестности каустик разного типа, проведен анализ поляризации продольной сейсмической волны и показано, что примесная компонента колебаний более выражена по сравнению с регулярными точками. Предложен новый подход к экстраполяции волнового поля из освещенной области каустики в зону ее тени на основе использования производных эйконала и лучевой амплитуды. Это позволяет избежать комплексного лучевого трассирования в зоне тени. Предложенные подходы были проверены на отражении продольной волны от криволинейной границы. По результатам этих исследований А.А. Дучковым защищена кандидатская диссертация.

В 2000 г. в группу сотрудников, занимающихся развитием метода многоволнового AVO-анализа, влился студент Максим Викторович Черепанов. Он занимался изучением азимутальных AVO-зависимостей продольных и обменных волн в анизотропных средах. Очень скоро он стал сложившимся специалистом в области теории распространения сейсмических волн в анизотропных средах. Его работа на соискание степени бакалавра, защищенная в 2001 г., получила первую премию на Всероссийском конкурсе дипломных работ. В дальнейшем М.В. Черепановым было получено приближенное линеаризованное решение для коэффициента отражения обменной  $PS$ -волны от кровли анизотропной среды в предположении малого контраста упругих свойств на границе и слабой анизотропии. Это исследование стало темой его магистерской работы, защищенной в 2003 г., и послужило основой для разработки методов решения обратной задачи по данным азимутального AVO-анализа продольных и обменных волн в анизотропных средах.

Дальнейшее исследование в этом направлении связано с оценкой влияния неоптимальных систем площадных наблюдений, применяющихся на практике, на точность определения параметров анизотропной среды по данным азимутального AVO-анализа. К работе подключился студент, а впоследствии магистрант ГГФ Руслан Фуадович Меликов. Он провел большой цикл исследований на модельных данных по оценке погрешностей метода посекторного AVO-анализа по удалениям и азимутам в условиях неполноты данных. С.В. Гольдиным перед сотрудниками лаборатории была поставлена задача: разработать алгоритмы и программы для восполнения данных 3D-наблюдений продольных волн с целью оптимизации азимутального анализа. Для решения этой задачи использовались два подхода: восстановление недостающих сейсмограмм на основе трехмерного ДМО-преобразования и восстановление амплитуд отраженных волн. В рамках первого направления аспирантом Евгением Владимировичем Мезенцевым (науч. руководитель С.В. Гольдин) был разработан численный алгоритм решения трехмерного уравнения ДМО. Расчеты проводились с помощью конечно-разностной схемы. М.В. Черепанов разработал и реализовал алгоритм пополнения данных в массиве амплитуд отраженных волн, основанный на интерполяции наблюдаемых амплитуд на равномерной сетке по удалениям и азимутам. Исследо-



вание этих алгоритмов показало, что восполнение недостающих площадных данных позволяет существенно увеличить точность определения оси анизотропии среды по данным AVOA-анализа.

В конце 90-х годов по инициативе С.В. Гольдина был организован ежегодный российский семинар «Геомеханика и геофизика», в котором принимали участие и сотрудники нашей лаборатории. Этот семинар существует и популярен и в наши дни, уже после безвременной кончины С.В. Гольдина. По итогам семинара издается ежегодный тематический выпуск журнала «Физическая мезомеханика», куда отбираются лучшие доклады.

Важным этапом в жизни лаборатории были совместные работы с ЗАО «Красноярскгеофизика», проведенные в 2001–2002 гг. на Юрубчено-Тохомской зоне (ЮТЗ) в Восточной Сибири по договору с нефтяной компанией «Юкос». Наши сотрудники участвовали в проведении полевых работ по методике трехкомпонентных профильных наблюдений МОГТ ЗС (В.В. Бузлуков) и в обработке полученных данных на ВЦ «Красноярскгеофизика» (аспиранты Татьяна Евгеньевна Тюленева, Василий Иосифович Келлер, В.В. Бузлуков). По условиям договора необходимо было также выполнить переработку архивных материалов профилирования МОГТ-МВС, полученных в предыдущие годы. Специальная обработка данных по алгоритмам Прони-фильтрации (Г.М. Митрофанов) и азимутального AVO-анализа (Т.Е. Тюленева, В.В. Бузлуков, Т.В. Нефёдкина) проводилась в ИГФ. Все эти работы выполнялись совместно с лабораторией многоволновой сейсморазведки при активном участии Сергея Борисовича Горшкалёва и Владимира Викторовича Карстена под общим руководством С.В. Гольдина. В результате исследований было показано, что верхняя часть разреза в районе ЮТЗ существенно анизотропна. Была изучена также анизотропия венд-рифейских отложений и определены направления оси симметрии и преимущественной трещиноватости рифейского нефтяного коллектора.

В 2004 г. в лабораторию пришла талантливая студентка ГГФ НГУ Любовь Викторовна Скопинцева. На протяжении шести последних лет она занимается AVO-анализом закритических отраженных волн. В ее бакалаврской и магистерской работах (руководитель Т.В. Нефёдкина) проведено исследование AVO-инверсии закритических отражений в задачах ГСЗ в рамках лучевого метода. Показано, что использование закритических отражений позволяет увеличить точность определения скоростей продольных волн. В то же время скорости поперечных волн и плотности определяются неустойчиво. Л.В. Скопинцева показала, что представление волнового поля на околоскритических и закритических удалениях в рамках лучевого метода некорректно и впервые предложила использовать для этих целей эффективные коэффициенты отражения, введенные на основе теории, разработанной сотрудниками отделения геофизики Камиллом Давыдовичем Клем-Мусатовым и Аркадием Марковичем Айзенбергом. После окончания магистратуры Л.В. Скопинцева продолжает свои исследования по этой теме в Норвежском научно-технологическом университете, будучи в то же время заочной аспиранткой ИНГГ. За последние три года коллективом авторов (Л.В. Скопинцева, Т.В. Нефёдкина, А.М. Айзенберг, Милана Аркадьевна Айзенберг, Мартин Ландро) получено существенное продвижение в тематике AVO-инверсии закритических отражений. Разработана новая модификация AVO-инверсии отраженных продольных волн на больших удалениях от источника с использованием эффективных коэффициентов отражения, которая позволяет существенно увели-

чить точность определения всех параметров среды. Эти результаты докладывались на международных конференциях EAGE в 2007–2009 гг.

В 2006–2007 гг., в связи с отъездом Г.М. Митрофанова на работу в Бразилию, обязанности заведующего лабораторией исполнял Юрий Анатольевич Орлов. В эти годы началось сотрудничество лаборатории с Институтом математики и Институтом вычислительной математики и математической геофизики в рамках интеграционного проекта СО РАН «Критические проблемы в применении обратных задач сейсмоки в нефтяной геофизике». Инициатором проекта и его координатором был С.В. Гольдин. Проект был рассчитан на три года. Ключевыми проблемами, препятствующими применению обратных динамических задач сейсмоки (ОДЗС) на практике, являются: учет верхней части разреза; преодоление реальной сложности задачи; изучение формы падающего в среду сигнала. За 2006–2007 гг. удалось существенно продвинуться в решении этих задач.

По первой проблеме был разработан алгоритм удаления кратных волн в операторной форме. Этот оператор преобразует волновое поле для среды с отражающей границей к волновому полю среды с прозрачной границей. Оператор применим для криволинейной дневной поверхности (с рельефом) (Ю.А. Орлов).

Основной проблемой оптимизационных алгоритмов является вычислительная сложность, которая проявляется и в ресурсоемкости прямой задачи (на каждой итерации), и в сложности поиска минимума целевой функции, которая, как правило, имеет много экстремумов. При решении ОДЗС выбор метода оптимизации зависит от того, известен ли градиент функции в аналитической форме или нет. Если градиент функции задан аналитически, оптимальным является BFGS-алгоритм. Если же градиент функции может быть вычислен только при помощи разностной схемы, то выбор метода зависит от размерности. В рамках исследований по оптимизационному решению редуцированной обратной задачи (AVO-инверсия продольных волн) проводилось сопоставление различных целевых функций по степени их «овражности», зависимости решения от начального приближения и точности оценок при наличии случайных помех. Во всех случаях сечения наиболее локализованы по скоростям продольных волн. Все функции имеют овражную структуру относительно скоростей поперечных волн и плотностей. Целевая функция, представляющая среднеквадратичный функционал невязки между наблюдаемым и теоретическим полем, продемонстрировала наивысшую устойчивость к погрешности начального приближения и к случайным помехам (Т.В. Нефёдкина, Л.В. Скопинцева, В.В. Бузлуков).

Задача определения формы сигнала была решена применительно к обработке данных акустического каротажа. Разработан алгоритм, позволяющий определить форму импульса продольной волны на фоне его интерференции с поперечной волной. Последующее вычитание продольной волны обеспечивает определение характеристик поперечной волны. Исследование на тестовых моделях показало высокую эффективность работы этого алгоритма при длине зонда 1–1,5 м (Ю.А. Орлов).

К сожалению, исследования по интеграционному проекту не были завершены в связи с кончиной С.В. Гольдина и прекращением финансирования.

В 2008 г. ученый совет ИНГГ выбрал на должность заведующего лабораторией д.г.-м.н. Ивана Юрьевича Кулакова. С этого времени основным научным направлением лаборатории стала сейсмическая томография.