

УДК 551.35.:519. 71

А. Г. Черников, Н. В. Либина

Прогноз структуры и свойств глубинного массива в районе Кольской сверхглубокой скважины

A. G. Chernikov, N. V. Libina

Prediction of structure and properties of the deep array near the Kola superdeep well

Аннотация. Разработана новая методика построения модели внутреннего строения массива горных пород, основанная на обработке данных рельефа земной поверхности с применением математического аппарата марковских процессов. В статье продемонстрированы возможности расчета скоростной 3D модели и отдельных разрезов на примере участка в районе Кольской сверхглубокой скважины.

Abstract. A new technique for building a model of the internal structure of rock mass has been developed. It is based on using the properties of Markov processes and data processing the earth's surface topography. The paper shows the opportunities of calculating speed 3D models and some of the cross-sections on the example of the area near the Kola superdeep well.

Ключевые слова: вероятностный прогноз, марковская статистика, 3D модель, зондирование.

Key words: probabilistic prediction, Markov statistics, 3D model, sensing.

Введение

В последнее время в мире возрос объем глубинных исследований Земли с применением методов разведочной геофизики. Это связано, помимо развития технической и методической базы, и с возросшим интересом геологов к глубинному строению Земли.

Сегодня доминирует устойчивое понимание того, что именно с глубинным строением Земли и происходящими в ней процессами связаны многие направления развития человечества, включающие вопросы удовлетворения потребностей в природных ресурсах, прогнозирования и управления возникающими природными и техногенными катастрофами, предсказания глобальных изменений в динамике природной среды.

Определенное воздействие на интенсификацию глубинных исследований оказал проект, осуществленный на Кольской сверхглубокой скважине СГ-3. Однако проведенный эксперимент с физическим проникновением внутрь Земли, предоставив исследователям обширный геологический материал, значение которого сложно переоценить, породил целый ряд вопросов, к решению которых было необходимо подключить, кроме контактных (каротаж), и дистанционные методы, в том числе геофизические и аэрокосмические.

Особое место в изучении глубинного строения Земли уделяется применению сейсмических методов, в частности – методов глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и МОВ – ОГТ (метод отраженных волн – общей глубинной точки). Существенно стимулировал развитие этих методов энергетический фактор, т. к. современный нефтегазовый сектор, освоив большинство неглубоко расположенных залежей углеводородов, приступил к разведке и освоению глубоко залегающих горизонтов. Поскольку основная часть разведанных запасов была связана с породами осадочного чехла и, в меньшей степени, с верхами подстилающего фундамента, сейсмические методы изначально были нацелены на исследования слоистых сред. "Для верхнего этажа осадков межблоковых впадин характерна ярко выраженная слоистость на сейсмических разрезах при благоприятной ориентации профилей 2D или сети 3D. Нижняя часть характеризуется, как правило, хаотичными сейсмическими событиями или полным отсутствием отражений, из-за чего ее могут ошибочно отнести непосредственно к массиву блоков (например к фундаменту). В любых случаях, отличных от данной горизонтально-слоистой модели (зачастую упрощенной), современные сейсмические методы будут давать серьезные сбои или окажутся непригодными. Это относится и к структурам, осложненным соляно-купольной тектоникой, перспективным структурам в горной местности (межгорных впадинах) и ко всем видам блоковых и межблоковых структур" [1]. Приводя столь обширную ссылку, мы переходим к основной теме, заявленной в нашей статье и сформулированной в процитированной выше работе на с. 37 [1]: "Чтобы создать новую поисковую методику и аппаратуру, нужно максимально четко задать поисковую геологическую модель".

Основные принципы марковской гипсометрической томографии (гипсотомографии)

Авторами был разработан метод вероятностного прогноза и построения 3D геологической модели глубоко залегающих отложений исследуемого района на суше, в море, в том числе в переходных транзитных зонах суша – море, основанный на изучении свойств рельефа Земли [2]. Для обеспечения многофакторного,

нелинейного, динамического прогнозирования и моделирования строения и свойств сложно построенной геологической среды как наиболее перспективный был избран математический аппарат нелинейной марковской статистики [3; 4].

Принципы, положенные в основу метода марковской томографии: границы разделов слоев обладают рельефом, а следовательно, и свойствами, последовательно сформированными условиями осадконакопления, эпигенезом, тектонической историей и последующей изменчивостью. Каждая из границ может быть математически описана в виде простой однородной марковской последовательности отметок значений свойств по множеству профилей, секущих границу раздела. Согласно теории марковских процессов, предыдущее состояние (марковское свойство подстилающего слоя) вероятностно определяет состояние последующее – марковское свойство покрывающего слоя. Это не означает прямое наследование предшествующего рельефа последующим. Наследуются собственно марковские свойства рельефа. Следовательно, изучая определенным образом марковские свойства на земной поверхности, появляется возможность получения информации о глубинном строении массива.

В качестве исходных данных метода используются топографические и батиметрические цифровые модели рельефа. Расчет осуществляется путем выполнения компьютерного анализа числовых последовательностей значений гипсометрических (батиметрических) отметок, измеренных в двух скользящих окнах АВ и MN, в которых эти величины преобразуются в значения переходных вероятностей случайной марковской последовательности (рис. 1).

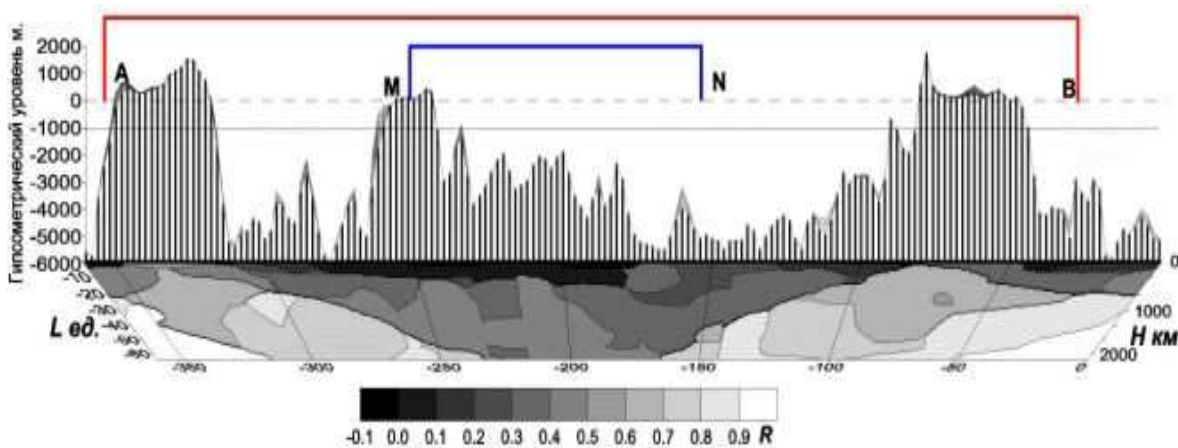


Рис. 1. Схема виртуальной установки марковского гипсометрического зондирования подповерхностных отложений

Глубину зондирования и детальность прогноза определяют следующие факторы: ширина окна сканирования (количество точек в исследуемой последовательности); шаг наблюдения (расстояние между точками); число определенных на шкале глубин марковских состояний (аналог частоты зондирования).

Полученные значения изменчивости марковских свойств пересчитываются в параметры петрофизических свойств по априорной информации об акустических и (или) плотностных свойствах среды. Для этого используется метод многомерной инверсии, с помощью которого выполнялись преобразования марковских характеристик среды в значения петрофизических параметров или, вероятностно, в оценки стратиграфических подразделений глубинных отложений. Затем, по преобразованному массиву данных, при помощи программы, использующей алгоритм нечеткого n -мерного марковского моделирования, создается 3D модель объекта [5; 6].

В основу алгоритма марковского n -мерного моделирования положен подход, предполагающий удержание в модели не значения координат точек n -мерного пространства и соответствующих им геолого-геофизических показателей, а вероятностный образ пространства и свойств моделируемых объектов. Создание вероятностного образа осуществляется на совокупности данных, в которой координаты точек рассматриваются как координаты фазового пространства, кодировка числовых значений которых представлена в виде марковской последовательности со строго определенными количеством и последовательностью шагов. Система использует нечеткие каналы наблюдения с ветвящимися графами марковских состояний. Принципиальное различие между четкими и нечеткими каналами заключается в том, что вероятность появления перехода относится к модальному значению класса в первом случае и к границам классов – во втором. Преобразованные описанным образом переменные и параметры создают математический образ системы, дальнейшее исследование которой выполняются с марковской последовательностью целочисленных значений для переменных с четкими каналами и с ветвящимися значениями – для каналов нечетких. На выходе получается вероятностная оценка распределения геолого-геофизических характеристик элементов объекта в объеме моделируемого массива (3D модель). Распознавание ведется по точкам фазового пространства, вероятность значений свойств в которых осуществляется по выбранным исследователем плоскостям сечения; задаются граничные точки

координат и шаг дискретизации. Визуализация модели осуществляется в виде набора ортогональных разрезов моделируемого геологического объекта.

Построение 3D модели Печенгского рудного района

В качестве очередного объекта – образца для моделирования и оценки рассчитанной модели – был принят Печенгский рудный район, для которого имелись широко представленные в открытом доступе материалы, "полученные благодаря созданию уникальной техники и технологии сверхглубокого бурения и проведения обширных исследований скважины СГ-3 и околоскважинного пространства, и по которым создана интегральная объемная геодинамическая модель, описывающая современное геологическое строение Печенгского рудного района до глубины 15 км, т. е. взаимное расположение геологических тел, по составу, деформациям и возрасту горных пород" [7]. "Она известна не только тем, что является самой глубокой в мире, пройденной по кристаллическим породам, но и тем, что не подтвердила структурные построения и петрофизические представления геофизиков о строении земной коры" [8].

Нами был выполнен проект гипсотомографического прогнозирования – моделирования глубинного строения (до 13 700 м) севера Российской части Кольского полуострова и прилегающей акватории Баренцева моря размером 300 × 200 км. На рис. 2 представлена цифровая карта рельефа (ИВСАО-3), принятая в качестве основы для глубинного 3D моделирования, и рассчитанные по ней томограммы (скоростные разрезы, изображенные в цветах, соответствующих прогнозным значениям кажущейся (прогнозной) скорости – V_k , м/с). Глубинные разрезы рассекают моделируемый массив по профилям, совпадающим с изображенными на карте координатными линиями, параллельными оси абсцисс. Аналогичные разрезы были рассчитаны и вдоль оси ординат.

Следует отметить, что расчет 3D модели выполнялся по единому алгоритму для всей совокупности геолого-структурных единиц в объекте, включая древние породы Балтийского щита, молодые отложения Баренцева моря и переходной зоны между ними. Это значит, что, несмотря на генетическое разнообразие исследуемых отложений, объект рассматривается как единая система, нелинейные переходы между элементами которой описываются и учитываются в расчетах за счет применения математического аппарата нелинейной марковской статистики.

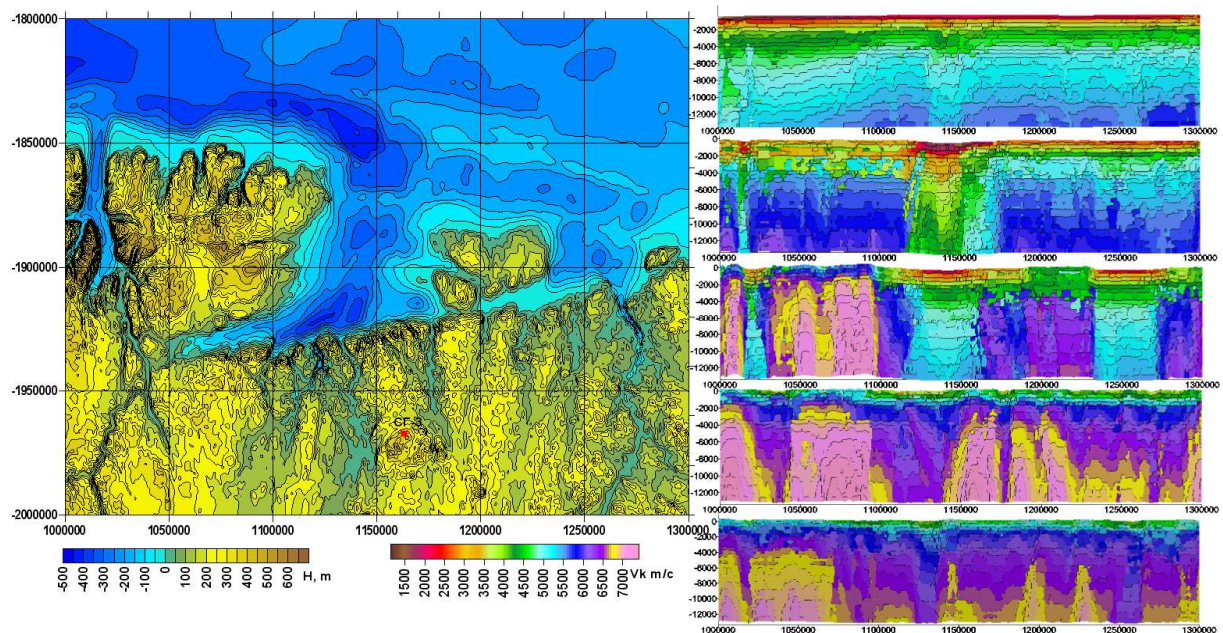


Рис. 2. Цифровая модель рельефа поверхности северной части Кольского полуострова и дна прилегающей акватории, сопоставленная с глубинными разрезами, рассчитанными методом марковской гипсотомографии. Цветовые палитры: левая – абсолютная высота геоида, правая – прогнозные значения кажущейся скорости продольных волн

Как видно из представленных на рис. 2 разрезов, в направлении берег – море просматриваются три геотектонические зоны:

- 1) преобладание слабо дифференцированных, высокоскоростных блоковых и межблоковых структур ($V_k = 6–7.2$ км/с);
- 2) переходная зона от щита – к шельфу, состоящая из блоков, чередующихся с пластовыми формами, заполняющими межблоковое пространство и, предположительно, являющимися продуктом разрушения самих блоков. Эти структуры резко дифференцированы по акустическим характеристикам (4.5–7.0 км/с);

3) шельфовая зона, характеризующаяся распространением слоистых осадочных отложений, выдержанных по площади, с четко проявленным нарастанием с глубиной значений акустических характеристик. Площадная монотонность строения и свойств отложений нарушается в зонах рифтогенеза. Скорость изменяется в диапазоне от 1.7 до 5.1 км/с.

Примечательной чертой прогнозного разреза (рис. 2) стала проявившаяся вертикально-блоковая структура фундамента, что резко отличается от наклонно-слоистой картины, прослеживаемой на мигрируемом разрезе ОГТ. Этот разрез протяженностью порядка 40 км был пройден в 1992 г. "Помимо высокого качества полученных сейсмограмм, освещающих глубины до 15–20 км, профиль ценен еще и тем, что пересекает скважину СГ-3" [9].

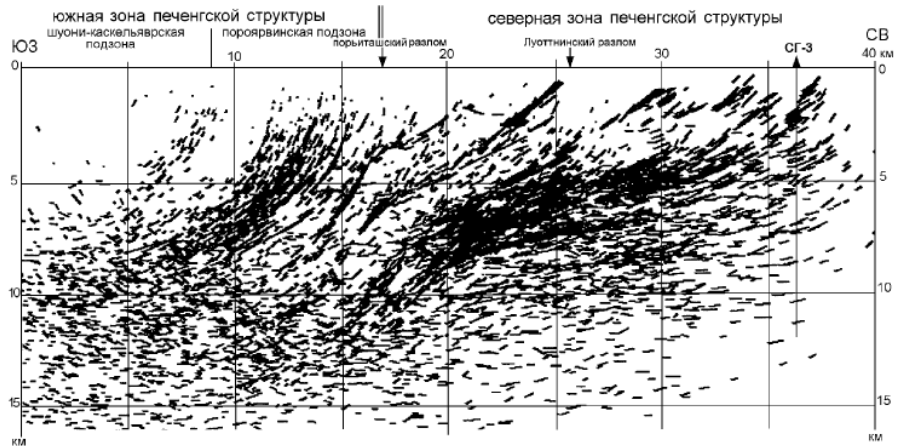


Рис. 3. Мигрированный разрез ОГТ по профилю KOLA CDP-92, пересекающему точку заложения скважины СГ-3 [9]

Получить сравнительные (качественные) оценки моделей подповерхностных отложений Кольского полуострова, рассчитанных с помощью методик, основанных на различных принципах (геофизических и геоинформационных), можно, сопоставляя их конечные результаты в едином геологическом пространстве. Для получения сопоставимого материала из 3D модели была рассчитана томограмма, также пересекающая координаты Кольской скважины (рис. 4).

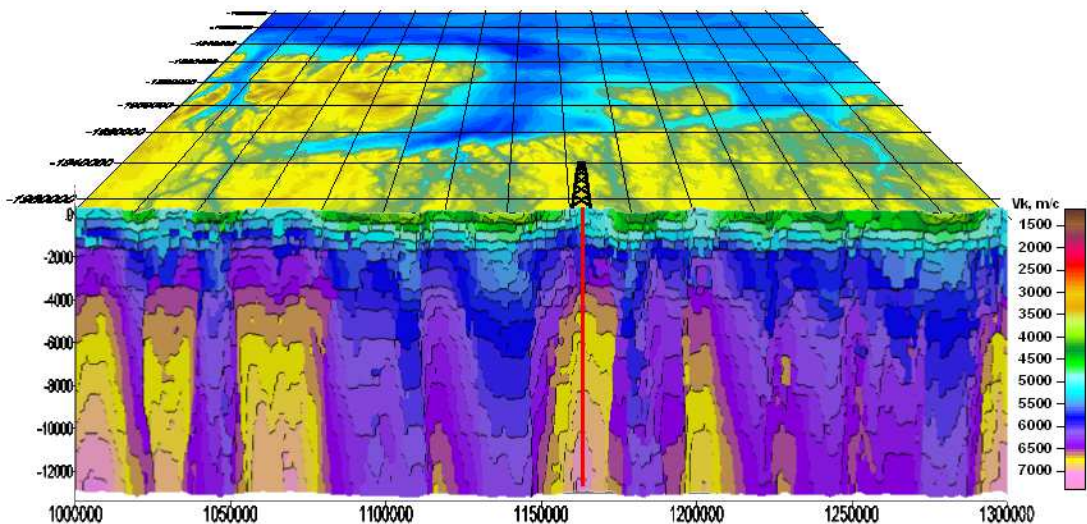


Рис. 4. Фрагмент 3D модели строения северной части Кольского полуострова, представленный в виде томограммы, пересекающий глубинный разрез, вскрытый скважиной СГ-3

Представленная на рис. 4 модель разреза позволяет предположить существенную неоднородность состава и строения моделируемой толщи. Причем нанесенная проекция оси скважины на прогнозную томограмму свидетельствует, скорее, об аномальности выбранного для глубинных исследований разреза относительно преобладающего (по частоте встречаемости свойств) комплекса отложений, представленных на профиле. Подсеченная скважиной вертикальная высокоскоростная структура позволила охарактеризовать отложения более глубинного генезиса, нежели окружающие осадки. Впрочем, это и было одной из основных задач, поставленных перед Кольской сверхглубокой скважиной.

На рис. 5 соединены два разреза, как показано на схеме слева.

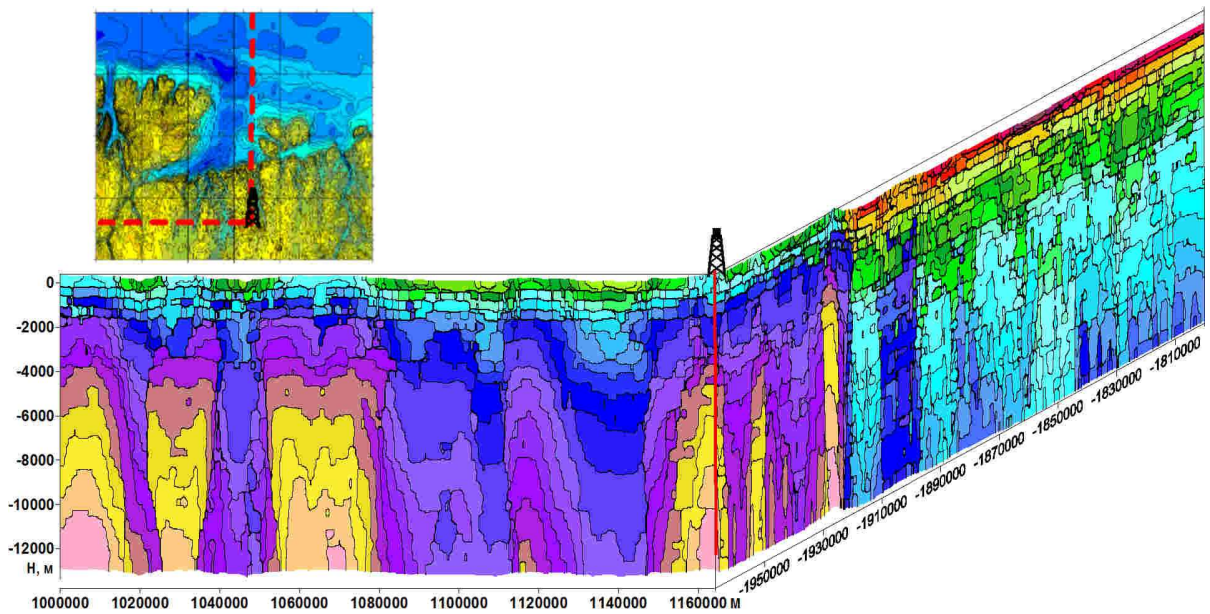


Рис. 5. Сочленение двух ортогональных разрезов по линии прохождения ствола скважины. Над разрезами – схема прохождения и сочленения профилей

Показательно, что разрез, направленный вкост береговой линии, демонстрирует резкую смену структуры и свойств породного массива. Преимущественно вертикальное залегание структур в контурах полуострова сменяется горизонтально-слоистым залеганием при пересечении береговой линии.

На этапе оценки возможностей метода гипсотомографии при моделировании глубинных отложений Балтийского щита осуществлялась оценка адекватности прогнозируемых значений кажущейся скорости путем сопоставления с данными акустического каротажа (АК) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП) (рис. 6). Сопоставление с данными кернового опробования не представлялось убедительным, т. к. на показания его акустических свойств сильное влияние оказывало техногенное воздействие процесса бурения, усиленное проявлением внутренних напряжений при локальной разгрузке массива.

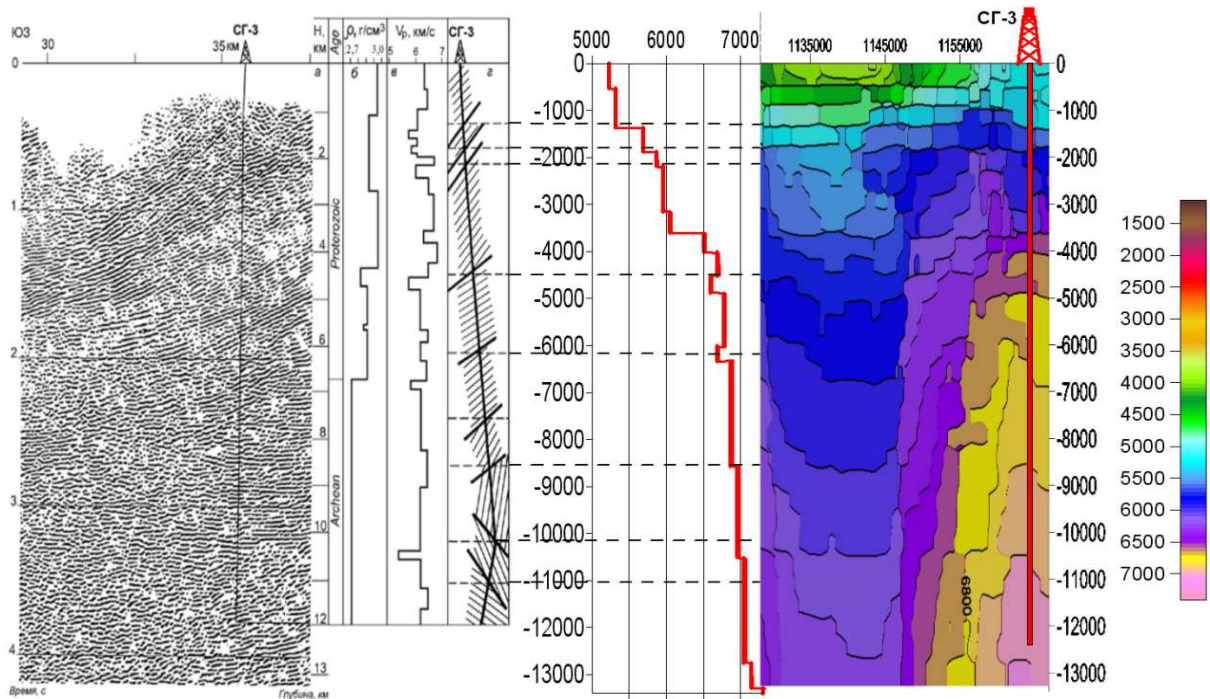


Рис. 6. Сопоставление данных сейсморазведки, свойств пород (а, б, в, г) по скв. СГ-3 [9] с результатами прогноза строения массива и значений кажущейся скорости по данным марковской гипсотомографии

Достоверность скважинных исследований не оценивалась. Различия в значениях оценок скорости наблюдаются в верхней части разреза. Занижение кажущихся скоростей в нашем разрезе объясняется тем, что использовалась модель прогнозируемой (кажущейся) скорости, разработанная для континентальных и морских отложений фанерозоя. Для районов обнажения пород дорифейской консолидации – щитов – необходима корректировка скоростной модели. Впрочем, отклонения в приповерхностной части находятся в пределах 0.7 км/с.

В большей степени на этапе предварительной оценки методики интересовали структурные особенности гипсотомографических моделей региона. Для учета вертикальной неоднородности геологического (блокового) строения массива "в районе Кольской скважины целесообразно провести детальные площадные сейсмические наблюдения, разрешающая способность которых была бы сравнима с размерами блоков, выделенных в ходе сверхглубокого бурения" [10]. Возможно, планированию подобных сейсмических работ, с предварительной оценкой положения и размеров блоков, помогут слайсы, отражающие латеральное распределение значений кажущихся скоростей на различной глубине от земной поверхности (рис. 7).

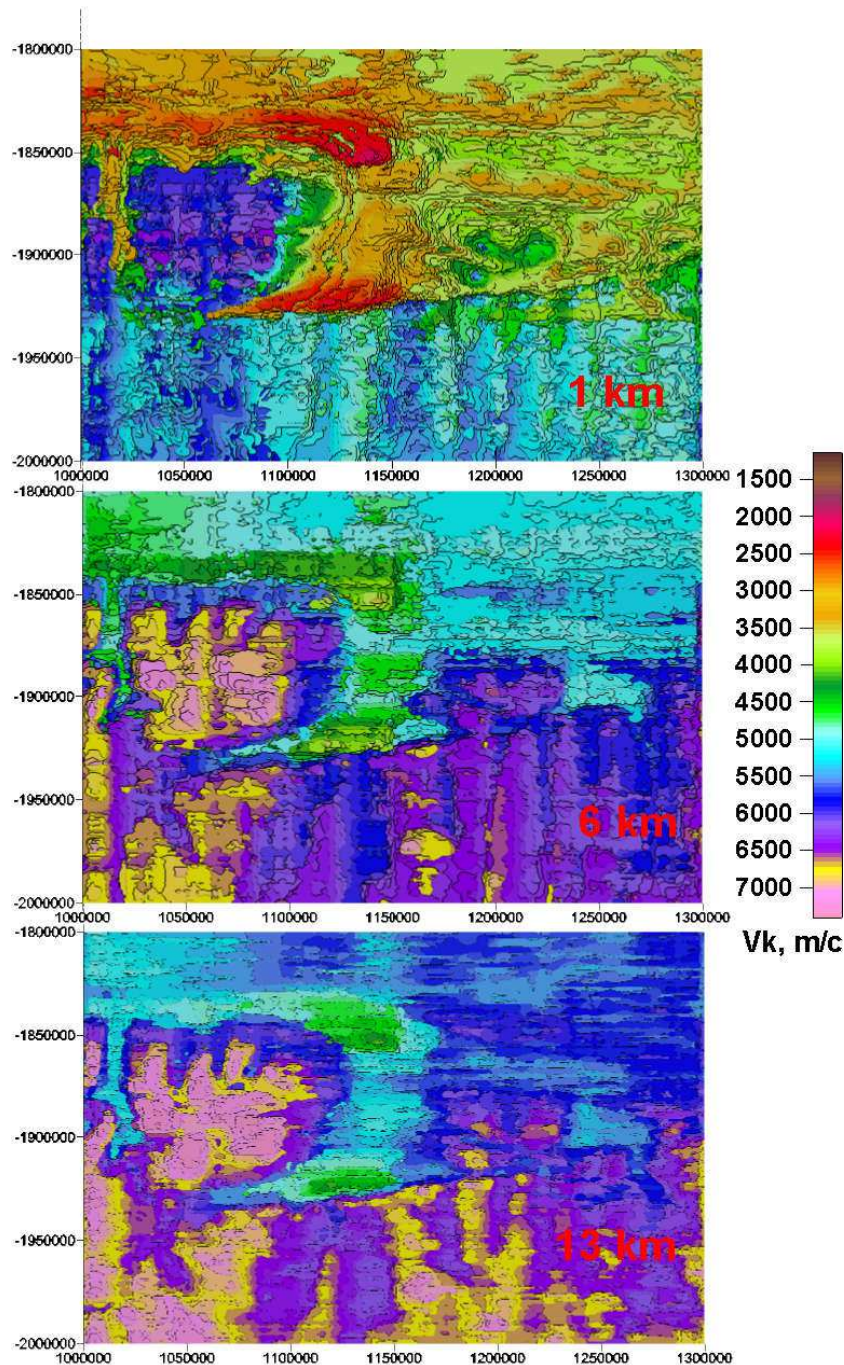


Рис. 7. Латеральная изменчивость модельных значений кажущейся скорости на томограммах различной глубинности

Следует отметить, что проиллюстрированная на материалах Кольского полуострова и его окрестностей методика прогнозирования глубинного строения не использовала какие-либо априорные данные о строении региона, за исключением электронной карты рельефа. Глубина прогнозирования была обусловлена глубиной скважины СГ-3, хотя реальных ограничений по площади объекта и глубине его зондирования методика не имеет.

Выводы

Предлагаемый метод позволяет:

- оперативно выполнить предварительный анализ глубинного строения еще неисследованных и труднодоступных районов; создать петрофизические 3D модели и по площадным данным выявить зоны структурных нарушений;
- осуществить корреляцию глубинных отложений между разнесенными участками;
- наметить участки для постановки детальных исследований комплексом геолого-геофизических методов;
- рассчитать глубинные геологические модели суши и шельфовых зон, проводить исследования в зонах со сложным рельефом и в пограничных зонах берег – море;

Для реализации решаемых данным методом задач авторами разработан, создан и опробован программно-методический комплекс.

Библиографический список

1. Коротков С. Б. Газ на больших глубинах: новые модели поисковых объектов и направления совершенствования методов ГРП. Обз. инф. М. : Газпром экспо, 2012. 108 с.
2. Черников А. Г., Либина Н. В. 3D моделирование внутренней структуры дна арктических морей // Материалы XX Междун. науч. конф. (Школы) по морской геологии. М., 2013. Т. I. С. 132–136.
3. Марков А. А. Исследование замечательного случая зависимых испытаний // Изв. Петерб. АН (6). 1907. Т. 1, № 3. С. 61–80.
4. Вистелиус А. Б. Основы математической геологии. Л. : Наука, 1980. 389 с.
5. Черников А. Г., Матушкин М. Б., Либина Н. В. Изучение внутреннего строения Земли на основе марковского анализа гипсометрии ее поверхности // Разведка и охрана недр. 2001. № 2. С. 57–59.
6. Черников А. Г., Либина Н. В. Использование марковской гипсотомографии при геологических исследованиях в океанологии // Океанология. 2011. Т. 51, № 3. С. 561–565.
7. Глубинное строение и геодинамика Печенгского рудного района. Опыт изучения Кольской сверхглубокой скважины / В. И. Казанский, О. Л. Кузнецов, А. В. Кузнецова, К. В. Лобанов, Е. Н. Черемисина // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36, № 6. С. 500–519.
8. К вопросу о корреляции данных сейсморазведки с геологическим строением земной коры (на примере рифейского обрамления северо-восточной части Балтийского щита) / Е. Н. Терехов, В. А. Журавлев, А. С. Балуев, С. Н. Тюпанов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле : тезисы докладов Всерос. конф. В 2 т. Т. 2. М., 2012. С. 406–410.
9. Трипольский А. А., Шаров Н. В. Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2004. 159 с.
10. Дружинин В. С., Карманов А. Б., Кашубин С. Н. Площадные системы наблюдений методом преломленных волн для определения объемной скорости модели // Геология и геофизика. 1990. № 4. С. 106–112.

References

1. Korotkov S. B. Gaz na bolshih glubinah: novye modeli poiskovyh ob'ektov i napravleniya sovershenstvovaniya metodov GRR [Gaz at big depths: New models of search objects and direction of improvement of the GRR methods]. Obz. inf. M. : Gazprom ekspo, 2012. 108 p.
2. Chernikov A. G., Libina N. V. 3D modelirovanie vnutrenney struktury dna arkticheskikh morey [3D modeling of the internal structure of the bottom of the Arctic seas] // Materialy XX Mezhdun. nauch. konf. (Shkoly) po morskoy geologii. M., 2013. V. I. P. 132–136.
3. Markov A. A. Issledovanie zamechatelnogo sluchaya zavisimyh ispytaniy [Research of a remarkable case of dependent tests] // Izv. Peterb. AN (6). 1907. V. 1, N 3. P. 61–80.
4. Vistelius A. B. Osnovy matematicheskoy geologii [Fundamentals of mathematical geology]. L. : Nauka, 1980. 389 p.
5. Chernikov A. G., Matushkin M. B., Libina N. V. Izuchenie vnutrennego stroeniya Zemli na osnove markovskogo analiza gipsometrii ee poverhnosti [Studying the internal structure of the Earth on the basis of the Markov analysis of hypsometry of its surface] // Razvedka i ohrana nedr. 2001. N 2. P. 57–59.

6. Chernikov A. G., Libina N. V. Ispolzovanie markovskoy gipsotomografii pri geologicheskikh issledovaniyakh v okeanologii [Use of Markov hypsotomography at geological researches in oceanology] // Okeanologiya. 2011. V. 51, N 3. P. 561–565.

7. Glubinnoe stroenie i geodinamika Pechenskogo rudnogo rayona. Opyt izucheniya Kolskoy sverhglubokoy skvazhiny [Deep structure and geodynamics of the Pechenga ore area. Experience of studying the Kola super-deep well] / V. I. Kazanskiy, O. L. Kuznetsov, A. V. Kuznetsova, K. V. Lobanov, E. N. Cheremisina // Geologiya rudnykh mestorozhdeniy. 1994. V. 36, N 6. P. 500–519.

8. K voprosu o korrelyatsii dannykh seysmorazvedki s geologicheskim stroeniem zemnoy kory (na primere rifeyskogo obramleniya severo-vostochnoy chasti Baltiyskogo schita) [To the question of correlation of data of seismic exploration with the geological structure of the crust (on the example of the Riphean frame of the northeast part of the Baltic Shield)] / E. N. Terehov, V. A. Zhuravlev, A. S. Baluev, S. N. Tyupanov // Tektonofizika i aktualnye voprosy nauk o Zemle : tezisy dokladov Vseros. konf. V 2 t. V. 2. M., 2012. P. 406–410.

9. Tripolskiy A. A., Sharov N. V. Litosfera dokembriyskikh schitov severnogo polushariya Zemli po seysmicheskim dannym [Lithosphere of Precambrian boards of the Northern hemisphere of the Earth on seismic data]. Petrozavodsk : Karelskiy nauchnyi tsentr RAN, 2004. 159 p.

10. Druzhinin V. S., Karmanov A. B., Kashubin S. N. Ploschadnye sistemy nablyudeniya metodom prelomlennykh voln dlya opredeleniya ob'emnoy skorosti modeli [Areal systems of observing refraction to determine the volume model speed] // Geologiya i geofizika. 1990. N 4. P. 106–112.

Сведения об авторах

Черников Александр Георгиевич – ООО "Газпром ВНИИ ГАЗ", канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: A_Chernikov@vniigaz.gazprom.ru

Chernikov A. G. – LLC "Gazprom Institute GAZ", Cand. of Geol. & Miner. Sci., Leading Researcher; e-mail: A_Chernikov@vniigaz.gazprom.ru

Либина Наталия Викторовна – Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, канд. техн. наук, стар. науч. сотрудник; e-mail: lnatvit@mail.ru

Libina N. V. – Shirshov Institute of Oceanology RAS, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher; e-mail: lnatvit@mail.ru