

# ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950

## GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES FOR STUDY OF DEEP OIL GENESIS

**D. A. Ilinskiy, K. A. Roginskiy, O. Y. Ganzha**

Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

*Oil in the world is exploring less and less against the backdrop of increasing consumption, which is a serious concern of experts. They predict the achievement of the oil peak production, after which world oil production will begin to plummet. Such forecasts assume that oil is a product of biological decay and, as a consequence, it must end. The hypothesis of inorganic synthesis of hydrocarbons has been developed in the period of 1980 – 2010. Oil has an inorganic nature and is subject to other genesis in the bowels of the Earth. In this case, a different distribution of hydrocarbon reserves in the earth's crust and their replenishment is expected, both in a particular sedimentary basin, and on the planet as a whole. One of the evidences of the presence of deep oil can be the presence of hydrocarbon reserves in sedimentary-rock basins that have a genetic link with grabens, deep faults and deep-seated edges of lithospheric plates, which are limited by seismic geodynamic zones. In other words, seismic studies are needed to build geological models at greater depths. The paper describes the progress that has occurred over the past decade in marine technology for refracted waves seismic. Examples of seismic works for imaging the deep structures in comparison with conventional industrial methods are given. Paper proposes a project for deep geological study of Black Sea for resolving the deep oil genesis problem. If the theory of deep oil is proven, it will revolutionize the understanding of the earth's energy reserves.*

*Keywords:* theory of hydrocarbon origin, seismic exploration methods, bottom seismographs, duplex waves, earth crust structure.

**For citation:**

Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Geophysical technologies for study of deep oil genesis." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.

**УДК 550.34**

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ГЛУБИННОЙ НЕФТИ

**Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа**

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
Москва, Российская Федерация

*В мире открывается все меньше новых месторождений нефти, а ее потребление растет. В связи с этим появляются прогнозы специалистов относительно достижения пика нефтяного производства, после которого мировая добыча углеводородов будет стремительно падать. Эти оценки исходят из того, что нефть является продуктом биологического распада и поэтому её запасы ограничены. В период 1980 – 2010 гг. получила развитие гипотеза о неорганическом синтезе углеводородов, согласно которой нефть имеет неорганическую природу и подчиняется другим законам образования в недрах Земли, так называемая «глубинная» нефть. В этом случае ожидается иное распределение запасов углеводородов в земной коре и их восполнение как в отдельно взятом месторождении и в осадочном бассейне, так и на планете в целом. Одним из доказательств наличия глубинной нефти может служить запас углеводородов в осадочных бассейнах, имеющих генетическую связь с грабенами, глубинными разломами и глубокопогруженными краями литосферных плит, которые ограничены сейсмоактивными геодинамическими поясами, а также найденные месторождения углеводородов в кристаллическом фундаменте. Иными словами, необходимы сейсмические исследования, направленные на построения геологических моделей среды на больших глубинах и не только в осадочных бассейнах, но и в породах кристаллического фундамента, где существующие*

*промышленные сейсмические методы отраженных волн не действуют. В статье дано описание прогресса, произошедшего в течение последнего десятилетия в морских технических средствах для проведения сейсмических работ на море по методу преломленных волн. Приводятся примеры конкретных работ, позволивших получить изображения глубинных структур и добиться повышения глубинности и информативности исследований по сравнению с обычными промышленными методами. В статье предложен проект изучения глубинного строения Черного моря для решения задач происхождения глубинной нефти. Если теория глубинной нефти будет доказана, то это произведет революцию в существующих представлениях об энергетических запасах Земли.*

**Ключевые слова:** теория происхождения углеводородов, сейсмические методы разведки, донные сейсмографы, дуплексные волны, строение земной коры.

**Для цитирования:**

Ильинский Д. А. Геофизические технологии для изучения процессов образования глубинной нефти / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.

## **Введение (Introduction)**

Как известно из источника [1], для изучения условий образования глубинной нефти необходимо знать структуру консолидированной части земной коры, лежащей глубже осадочного чехла. Ряд гипотез образования глубинной нефти связывает этот процесс с путями миграции флюидов в консолидированной коре по системе трещин как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Потоки флюидов затем проникают в осадочный чехол, способствуя образованию нефтяных месторождений.

По результатам обобщения глубинных сейсмических исследований земной коры [2] были выявлены зоны пониженных скоростей, которые характеризуются также повышенной проводимостью (по результатам глубинных электромагнитных исследований). Кроме того, результаты проведенных глубинных сейсмических исследований позволяют выделить зоны нарушений, проявляющихся в виде глубинных разломов или зон повышенной трещиноватости, которые могут быть заполненными флюидами или сухими. Такие зоны в земной коре имеют повышенную проницаемость. Гипотезы образования глубинной нефти связывают эти объекты земной коры с зонами миграции флюидов, которые приводят к образованию глубинной нефти.

Современное развитие технологий сбора сейсмических данных, касающихся (особенно при проведении морских исследований) точности службы времени и навигации, чувствительности каналов, собственного шума приемного сейсмического тракта и динамического диапазона регистрации данных, позволяет собирать качественные сейсмические глубинные данные для точной идентификации аномальных зон в земной коре, связанных с миграцией глубинной нефти.

Развитие методов обработки данных позволяет уверенно выделять аномальные зоны, связанные с возможным формированием глубинной нефти. Обработка рассеянной компоненты волнового поля дает возможность получать изображение зон трещиноватости в консолидированной земной коре, а также разделять *флюидонасыщенные* и *сухие* системы трещин. Особенно интересно проводить детальные глубинные исследования в районах с уже открытymi большими месторождениями. Полученное глубинное строение коры, возможно, позволит установить связь открытых нефтяных резервуаров с выявленными особенностями строения земной коры. В период с 2009 по 2016 гг. разработаны новые донные сейсмические инструменты для работ на глубинах моря от 0 до 7 км. Одним из способов применения этих инструментов является проведение глубинных сейсмических исследований на море на всю глубину до границы Мохоровичича методом широкогоугольного сейсмического профилирования.

В данной статье описываются новые свойства донных инструментов, их характеристики и примеры успешного применения для изучения строения земной коры. Предложены новые проекты изучения строения земной коры на примере Черного моря, выполнен расчет времени проведения работ и описаны полученные результаты.

## Методы и материалы (Methods and Materials)

Начало 2000-х гг. ознаменовано разработкой и использованием ряда компактных самовсплывающих донных сейсмографов. В России к таким разработкам относятся исследования Опытного конструкторского бюро океанологической техники по заказу компании ЛАРГЕО. Донные станции успешно использовались не только для исследования земной коры, но и для осадочных подбазальтовых структур и газогидратов в океане (рис. 1). Аналогичная аппаратура была создана в Германии вначале как опытная разработка Гамбургского университета, а затем модернизированная в России в ООО «ГеоПро». Несмотря на то, что станции постоянно модифицировались, основные технические параметры оставались на уровне начала 2000-х гг. Кроме выпуска станций для собственных нужд, компания выпустила и продала около 60 станций другим институтам и организациям с широкой географией от Европы до Азии, включая Индию, Китай, США (Университет Техаса) и Россию (Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской Академии наук). Как и российская разработка компактных самовсплывающих донных сейсмографов, станция ГеоПро нашла свое применение не только для глубинных исследований земной коры, но и для нужд нефтяной промышленности, а также для изучения локальной сейсмичности и инженерных работ. В частности, в 2002 г. была проведена первая в мире трехмерная площадная донная сейсмическая съемка на глубинах около 2 км в Мексиканском заливе.

На примере исследования разработки второго поколения станций компании «Геонод Разведка» дадим подробный ответ на вопрос: в чем заключаются изменения в развитии технологии разработки донных сейсмических станций в течение последних десяти лет.

1. Существенно изменилась элементная база, электронные приборы минимизировались, и соответственно, уменьшилось энергопотребление и собственные шумы. Все это позволило создать компактную станцию размером 330 мм в диаметре вместо 450 мм. При этом вес ее снизился вдвое, причем автономность не только не уменьшилась, но и увеличилась до 90 сут за счет уменьшения энергопотребления и увеличения емкости элементов питания. Увеличился динамический диапазон регистрируемых сейсмических сигналов за счет как уменьшения собственных шумов электронной аппаратуры, так и использования 24-разрядных аналого-цифровых преобразователей. Уменьшились размеры приборов, снизилось их энергопотребление, а точность кварцевых часов улучшилась на порядок. При этом создание оптимальных алгоритмов временной привязки позволило достичь точности около 1 мс в течение всего времени автономной работы станции.

а)

б)

в)



*Рис. 1. Три поколения самовсплывающих сейсмических донных станций*

*для глубинных исследований земной коры:*

*а — ЛАРГЕО-ОКБ (2004 г.); б — ГЕОПРО (1996–2008 гг.);*  
*в — ГЕОНД (2014 г.)*

Технология современной высокоскоростной беспроводной передачи данных позволила создать «необслуживаемую» станции в период ее автономной работы. Станция дает возможность ее многократного использования на различных участках морского дна без вскрытия глубоководного контейнера для скачивания данных, зарядки батарей, синхронизации часов и дает возможность избежать повторной герметизации ее корпуса. Трудозатраты на работу со станциями многократно снижаются, что особенно важно в полевых условиях для минимизации времени работы и, соответственно, уменьшения использования дорогостоящего судового времени (данные приведены в таблице).

**Сравнение технических характеристик трех поколений самовсплывающих  
донных регистраторов от трех разных производителей**

Параметр	Сейсмические донные станции		
	ЛАРГЕО-ОКБ	ГЕОПРО	ГЕОНОД
Разрядность АЦП	21	24	32
Автономность работы	8 дней	14 дней	90 дней
Стабильность часов	$2 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-9}$
Синхронизация часов	Внешний GPS, открытие корпуса	Внешний GPS, открытие корпуса	Встроенный GPS, автоматическая синхронизация через корпус
Емкость накопителя данных	6 Гб	32 Гб	32 Гб
Способ копирования данных	Открытие корпуса	Открытие корпус или через подключаемый кабель	Беспроводной USB, 15 Мбит/с
Частотный диапазон геофонов	5 Гц–1 кГц	1 Гц–1 кГц	0,5 Гц–1 к Гц
Средства обнаружения на море	Лампочка	Лампочка, радиопеленг, флаг	Лампочка, радиопеленг и передача координат, флаг
Вес без якоря	40 кг	35 кг	20 кг
Диаметр сферы	45 см	43,2 см	33 см
Размыкатель	Электрохимический (только соленая вода)	Электрохимический (только соленая вода)	Электрохимический / электромеханический (любая вода)
Возможность модификации якоря	Нет	Да	Да
Дополнительные датчики	Наклономер компас	Компас	Компас, 3Д-акселерометр, датчики температуры и давления, монитор расхода емкости батарей, самотестирование
Состав якоря – экология	Железобетонный	Железный	Саморазлагающийся на компоненты морского дна и воды, экологически чистый

Существенным фактором является создание надежной системы всплытия, которая включает в себя наряду с качественной гидроакустической связью надежный размыкатель не только электрохимический, но и механический, позволяющий использовать оборудование также и в пресной воде. Опыт применения станций позволил понять причины невозможности всплытия станций

на поверхность, основной из которых оказалось засасывание станции рыхлыми осадками на дне. Простейшее устройство в виде выталкивающих пружин позволяет с высокой вероятностью обеспечить отрыв станции от якоря. Изменилась и схема поиска станций на поверхности. Если раньше это был визуальный поиск, то теперь по радиоканалу передаются координаты, и поиск возможен 24 ч в сутки даже при плохой видимости. В ночное время станция хорошо видна по сигнальной лампе, находящейся внутри.

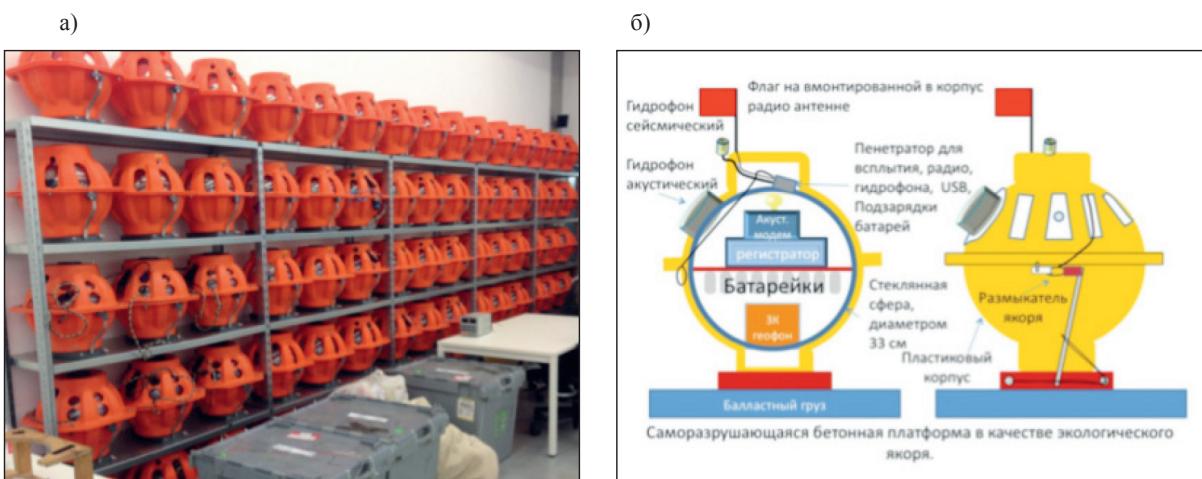


Рис. 2. Фотография парка станций (а)  
и схема самовсплывающей станции «Геонод» (б)

Созданный парк станций «Геонод» (рис. 2, а) применялся как для работ в транзитных зонах [4], так и в глубоководных проектах [5]–[6]. На основе регистратора донной станций была создана и испытана широкополосная восьмиканальная кабельная сейсмологическая станция, работающая по протоколам реального времени [7].

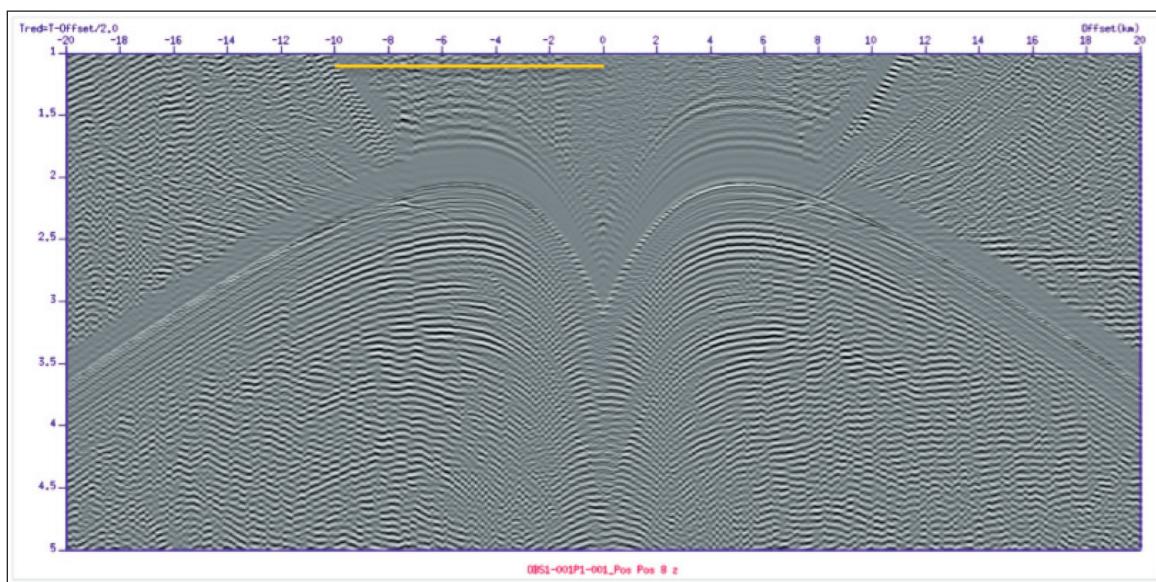
Ключевые характеристики станций [3] — рис. 2, б:

- малое потребление энергии — нет перерыва на подзарядку при съемке;
- беспроводное копирование собранных данных после всплытия на поверхность — многократные быстрые перестановки на дне;
- экологический якорь разлагается в воде после проведения съемки на составляющие окружающей среды.

2. Появилось различное математическое обеспечение, позволяющее в разы уменьшить время обработки и интерпретации. Расчет прямых кинематических задач происходит за доли секунд на ноутбуках. Визуализация возможна не только в виде отдельных трасс, но и в цвете с различными параметрами обработки исходных сейсмограмм (рис. 3). Это дает возможность увидеть не только первые вступления, но и последующие. Развились методы томографии как по первым вступлениям, так и многоволновая томография, когда возможен учет различных типов волн. Основные операции происходят с помощью работы с экранными формами, а не с цифрами, вводимыми вручную. Визуализация дает возможность выполнения оперативной и наглядной интерпретации выделяемых для обработки волн.

3. Изменился подход к процессу получения скоростных глубинных разрезов. Классическая схема работы всегда включала пикирование вступлений, их идентификацию, получение данных с наблюденных гидографов, сравнение ее с расчетным временем путем кинематического моделирования по изменяемой скоростной модели и смены идентификации пикированных гидографов при необходимости. Для получения первичной информации для скоростного разреза применялась томография по первым вступлениям, т. е. вся работа по созданию скоростной модели происходила на поле гидографов, получение которого существенно зависит от квалификации и опыта геофизика и привносит большую долю субъективности и неопределенности.

a)



б)

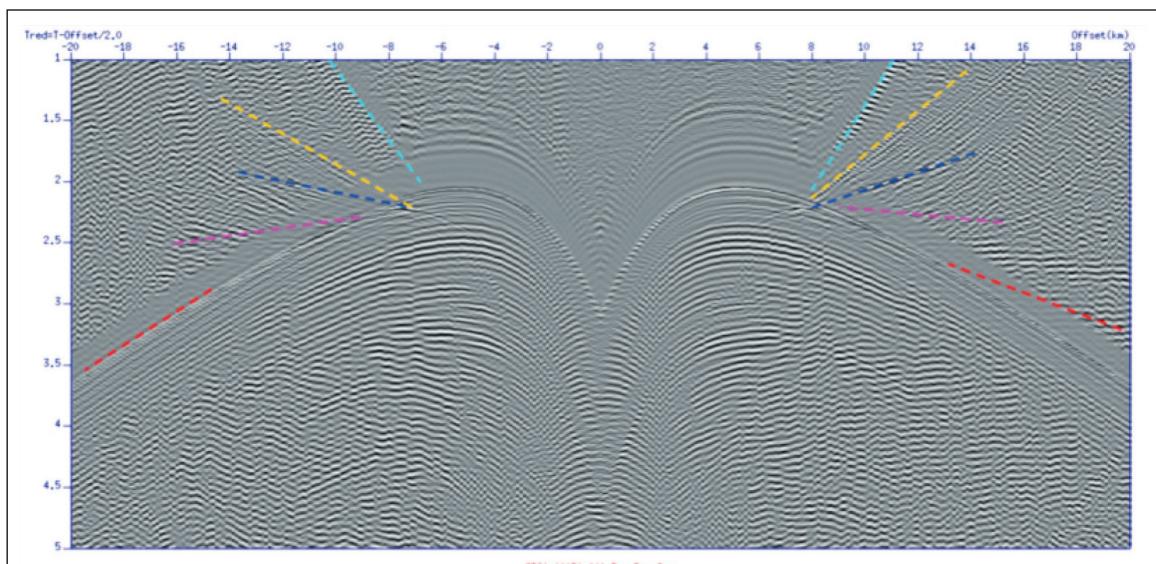


Рис. 3. Пример сейсмограммы общей точки приема с введенной линейной поправкой со скоростью 2 км/с:  
а — пример сейсмограммы общей точки приема с введенной линейной поправкой со скоростью 2 км/с

*Вертикальный геофон:* идентификация слоев по вступлениям отраженных и преломленных волн.

Выбранная апертура наблюдений — 40 км (для сравнения желтой линией показана длина буксируемой косы в 10 км),  
горизонтальная шкала: удаление источник – приемник, км;

вертикальная шкала времени в редуцированном масштабе:  $T_{\text{ред}} = T - \text{удаление (км)} / 2$  (км/с);

б — пример сейсмограммы общей точки приема с введенной линейной поправкой со скоростью 2 км/с

*Вертикальный геофон:* идентификация слоев по вступлениям отраженных и преломленных волн.

Выбранная апертура наблюдений 40 км, горизонтальная шкала: удаление источник – приемник, км;

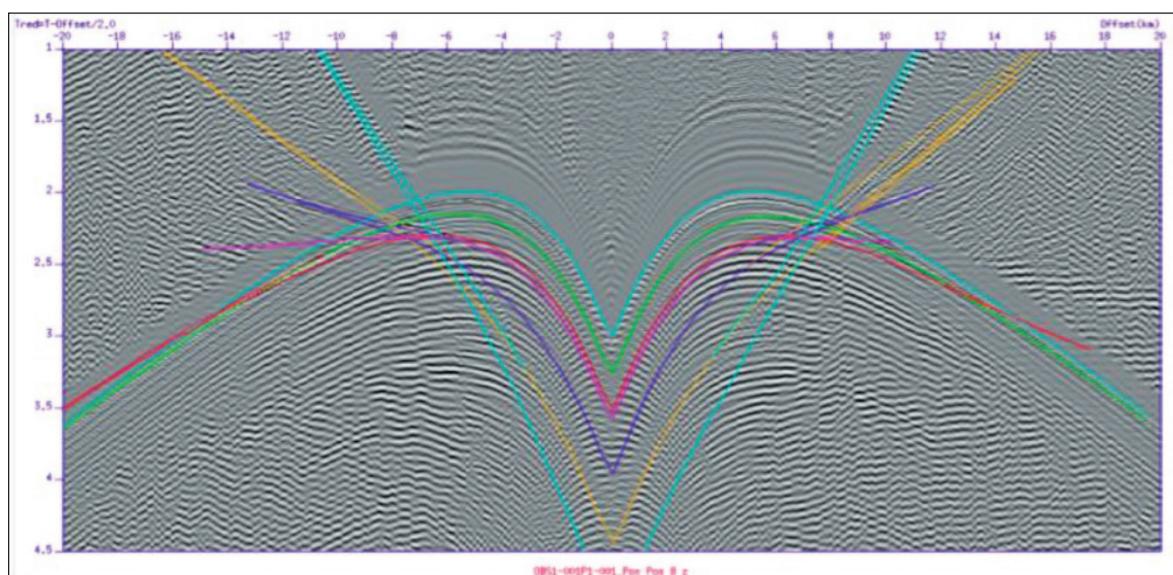
вертикальная шкала времени в редуцированном масштабе:  $T_{\text{ред}} = T - \text{удаление (км)} / 2$  км/с

Необходимо также отметить ограниченность применения метода послойной томографии при создании слоистых моделей. Этот метод дает неплохие результаты только для простых моделей. При малом объеме информации он требует довольно хорошего приближения к истинной скоростной модели, в противном случае процесс может не привести к правильному решению.

В настоящее время развитие графического экранного интерфейса дает возможность выделять вступления волн на поле сейсмических трасс (сейсмограмм общей точки приема) с последу-

ющим наложением на него расчетных годографов при одновременном контроле идентификации вступлений с помощью лучевых диаграмм.

а)



б)

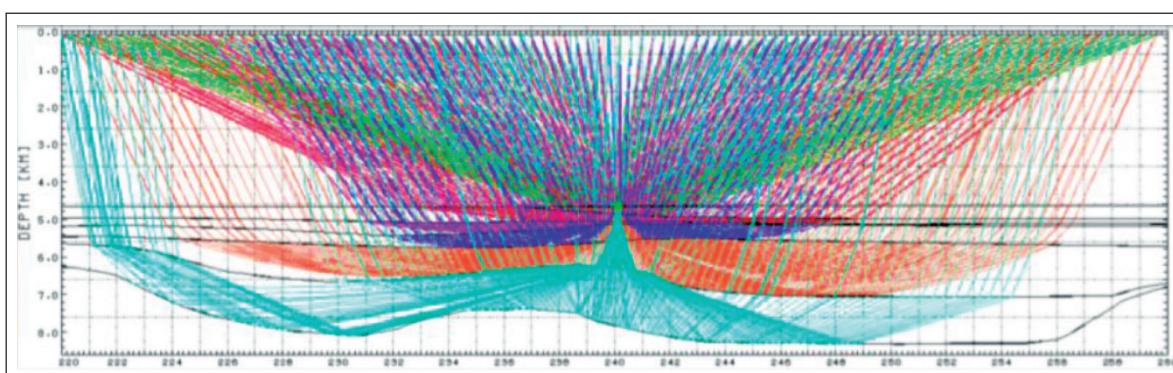


Рис. 4. Пример сейсмограммы общей точки приема с введенной линейной поправкой со скоростью 2 км/с:  
а — выделение вступлений волн на поле сейсмических трасс;  
б — результирующий разрез, полученный с помощью моделирования лучевым методом

В настоящее время развитие графического экранного интерфейса дает возможность выделять вступления волн на поле сейсмических трасс (сейсмограмма общей точки приема) с последующим наложением на него расчетных годографов при одновременном контроле идентификации вступлений с помощью лучевых диаграмм (рис. 4). На рисунке результирующий разрез получен с помощью моделирования лучевым методом времени пробега от идентифицированных слоев по всем наблюденным станциям. Подбор скоростной модели выполняется с помощью расчета прямой кинематической задачи, что ускоряет получение финального разреза с хорошей увязкой волнового поля. Особенно данный метод хорошо работает при построении осадочного чехла, который не виден в первых вступлениях и обычно брался из разрезов методом отраженных волн общей глубинной точки (МОВ ОГТ) в случае, если они присутствовали, иначе расслоение осадков обнаружить не удавалось. Таким образом, удалось приблизиться к действительно многоволновой сейсморазведке.

### Результаты (Results)

Приведем некоторые существенные характеристики морской сейсмической 2Д съемки с донными регистраторами. Точность привязки станций на дне, даже при больших глу-

бинах (более 4 км), достигает 2 м. Точное определение положения сейсмометра на дне важнее для дальнейшей обработки, чем точка сброса станции на поверхности моря, установленная по предварительному плану съемки. Точность хода часов по отношению к точному времени GPS/GLONASS  $\pm 1$  мс. Большой мгновенный динамический диапазон регистрации составляет не менее 125 дБ. Для сравнения здесь приведены активные данные, полученные в 2004 г. с пневмоисточником, имеющим общий объем 5000 куб. дюймов при глубинах моря около 3,7 км. Тогда максимальное удаление источника от приемника, на котором прослеживались закритические отраженные и преломленные волны, составило около 110 км. В 2015 г., при проведении работ со сходным объемом сейсмического источника (5500 куб. дюймов) и глубиной моря около 4,5 км в районе, близком к проведению работ 2004 г., максимальное удаление наблюдаемых волн уже составило около 260 км при его типичном значении 110 км. Также приводятся примеры выделения осадков в последующих вступлениях, сравнение скоростной модели, полученной с помощью донных регистраторов с разрезом методом отраженных волн общей глубинной точки МОВ ОГТ. Для сравнения: временные затраты для получения скоростной модели с донными регистраторами на профиле длиной 420 км составили три недели, включая морские работы. В то же время затраты на получение окончательного разреза ОГТ на этом же профиле составили по времени около 3 мес., включая морские работы и обработку данных на берегу. Глубинный диапазон исследований с донными станциями позволяет проследить строение земной коры до верхней мантии, в то время как на разрезах ОГТ виден в основном осадочный чехол до поверхности консолидированной коры, а иногда удается увидеть отражения от слоев нижней коры, которые можно надежно интерпретировать только при сопоставлении с результатами донных наблюдений.

На рис. 5 – 7 показаны профили и результаты глубоководных морских работ с сейсмическими донными станциями «Геонод», выполненные по заказу крупнейшей добывающей индийской государственной нефтегазовой корпорации (ONGC) в 2012 г.

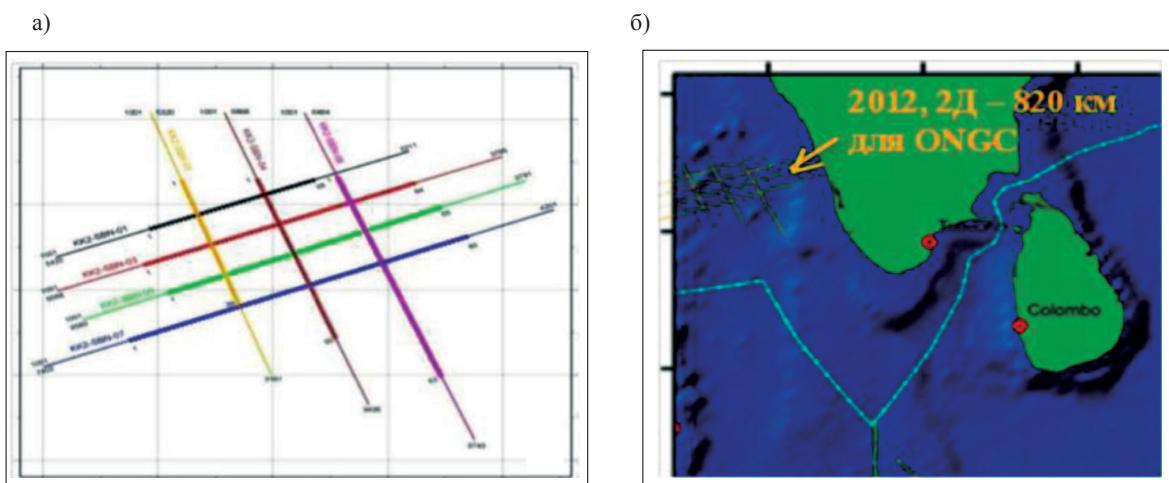


Рис. 5. Глубоководные морские работы 2012 г. в Лаккадивском море:  
а — схема расположения 2Д профилей с донными регистраторами (800 пог. км с расстоянием между станциями 2 км (всего 420 постановок донных станций, семь профилей));  
б — положение профилей на батиметрической карте Индийского океана

Обработка рассеянной компоненты сейсмического поля, в особенности дуплексных обменных рассеянных волн, использующих все три компоненты записи на геофонах, дает важную дополнительную информацию не только для картирования трещиноватости в земной коре, но также и для распознавания флюидо-насыщенных и сухих трещин.

Канадская компания *TetraSeis Inc.* разработала новый тип глубинной миграции до суммирования, которая называется *дуплексно-волновой миграцией* (ДВМ), и получили патент США на эту технологию в 2005 г. ДВМ способна строить изображения вертикальных и близких к верти-

кальным ( $90^\circ \pm 30^\circ$ ) структур. ДВМ-технология предоставляет непосредственные доказательства существования близко вертикальных структур и позволяет определять их местоположение [8], [9]. В качестве модификации метода ДВМ для многокомпонентной регистрации и использования многоволновой сейсмики авторами дуплексной миграции был предложен метод миграции двух взаимных полей, получаемых на трехкомпонентном геофоне.

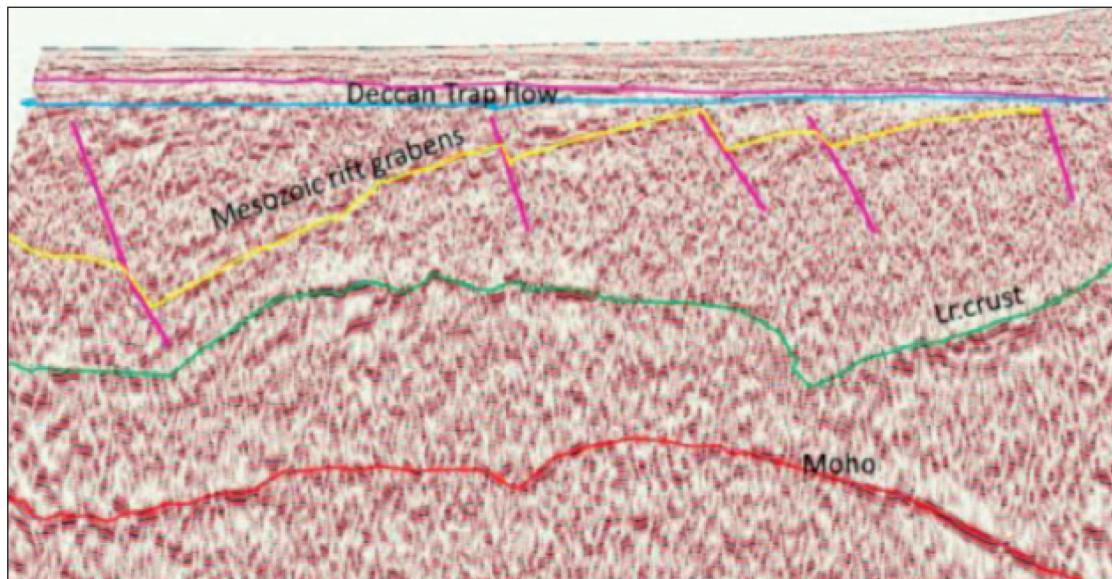


Рис. 6. Пример 2Д изображения, полученного по данным съемки с донными регистраторами в Лаккадивском море

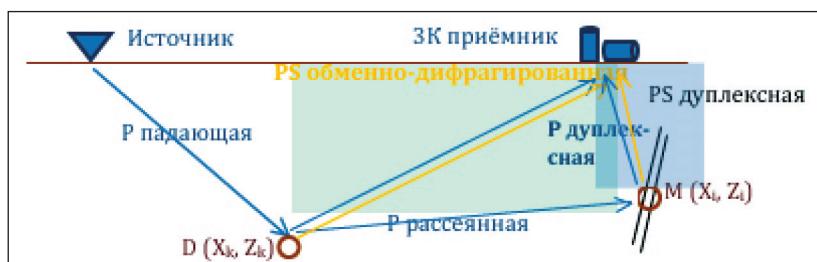


Рис. 7. Лучевая диаграмма, объясняющая образование дуплексных обменных волн

Для реализации миграции используются два взаимно образующих волновых поля. В частности, это могут быть поля продольных и поперечных волн.  $S$ -волны образуются как результат обмена  $P$ -волн на целевых близко расположенных вертикальных неоднородностях изучаемой геологической среды. Первичная падающая от источника  $P$ -волна рассеивается на точках дифракции среды и в виде рассеянной  $P$ -волны достигает близко расположенной вертикальной целевой границы. Приемники записывают эту волну как обменную дуплексную  $PS$ -волну после обмена на близко расположенной вертикальной границе. Аналогичный путь может быть пройден первичной падающей  $S$ -волной и тогда приемники запишут  $SP$ -обменную волну. Предлагаемый метод работает как с разделенными полями (представленными отдельно на разных сейсмограммах), так и с неразделенными полями (представленными на одной и той же или на разных сейсмограммах).

Синий прямоугольник на рис. 7 показывает область, где должна быть известна скорость продольных и поперечных волн для миграции взаимных дуплексных волн, а зеленый — область, где должны быть известны скоростные модели  $P$  и  $S$  для миграции взаимных дифрагированных волн. Для простоты рассмотрим случай, когда  $P$ - и  $S$ -волны разделены. Такое разделение являет-

ся характерным для наземных наблюдений при значительной зоне малых скоростей. В этом случае все волны будут распространяться субвертикально к поверхности наблюдений, в результате чего на  $Z$ -компоненте будут регистрироваться преимущественно  $P$ -волны, а на  $X$ -компоненте —  $SV$ -волны. В случае, когда поля не разделены, например, проводятся наблюдения вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) или при помощи донных многокомпонентных приемников на вход миграции можно подавать одну и ту же компоненту волнового поля, предполагая, что на ней присутствуют оба поля. В случае разделения полей отраженные и проходящие обменные волны будут регистрироваться на  $X$ -компоненте и используя продолжение волнового поля вниз, их можно сфокусировать на породивших их неоднородностях. Для этого достаточно иметь скоростную модель продольных и поперечных волн выше этих точек и необязательно знать скорости в нижней части разреза, где произошло первое дуплексное отражение. По этой же причине в данном случае не требуется знание скоростей на участке от пункта возбуждения до точек первого отражения. Т. е. требования к скоростной модели и, соответственно, к неоднородностям, не учтенным этой скоростной моделью, существенно снижаются, что весьма важно при работе в кристаллическом фундаменте.

Теперь рассмотрим продольные волны, которые будут фиксироваться на  $Z$ -компоненте и при помощи продолжения волнового поля вниз вернем их назад к вертикальным неоднородностям. Для этого необходимы скорости продольных волн над рассматриваемыми неоднородностями. Свойством такого продолженного поля будет то, что на искомых неоднородностях, где произошел обмен, время прихода продольных волн будет совпадать со временем прихода обменных  $PS$ -волн. Таким образом, если продолжить вниз поля  $Z$ - и  $X$ -компонент (сейсмограмму общего пункта возбуждения) и на каждом уровне  $Z_i$  провести взаимную корреляцию продолженных полей, выполненную по формуле  $F(X_i, Z_i) = \sum_{\omega} U_{xi}(X_i, Z_i, \omega)U_{zi}^*(X_i, Z_i, \omega)$ , где  $*$  — комплексное сопряжение;  $\omega$  — частота сигнала,  $U_{xi}(X_i, Z_i, \omega)$  и  $U_{zi}(X_i, Z_i, \omega)$  — продолженные волновые поля в спектральной области, относящиеся к точке  $(X_i, Z_i)$ , то последняя, в соответствии с принципом Клайербуга [10], даст сейсмическое изображение среды  $F(X_i, Z_i)$  на соответствующем уровне. В формировании такого изображения будут автоматически участвовать все типы продольных и обменных волн, как дуплексные монотипные и обменные, так и отраженно-проходящие монотипные и обменные. Кроме того, будет формироваться изображение по обычным однократно отраженным и обменным волнам, так как в точках отражения разделение волн на продольные и обменные будет аналогичным. Это означает, что в условиях дискретно неоднородной среды будут формироваться изображения первичных рассеивателей (диафрагмирующих объектов), участвующих в формировании рассеянно-дуплексной волны. Продолжение волнового поля вниз может быть при помощи применения любого из известных алгоритмов, а именно: решения волнового поля в спектральной области; конечно-разностного решения одно- и двухстороннего волнового уравнения; решения на основе интеграла Кирхгофа и др.

### Обсуждение (Discussion)

Появление новых технологий сбора и обработки данных, рассмотренных ранее, позволяет получать значительно более информативную картину строения земной коры при одновременном уменьшении затрат на проведение исследований. Для иллюстрации новых возможностей предлагается рассмотреть *проект изучения глубинного строения земной коры для исследования происхождения глубинной нефти на примере Черного моря*. Изученность глубинной структуры земной коры Черного моря в настоящее время явно недостаточна, особенно по сравнению с изученностью строения осадочного чехла, выполненного по технологии буксируемых кос (рис. 8) [11], [12].

На рис. 9 показаны примеры того, что могут дополнительно дать исследования с донными станциями на длинных профилях по сравнению с результатами, полученными с помощью буксируемых кос на примере работ 2005 г. (длинный профиль в котловине) и 2011 г. (профиль, оттененный зеленым фоном на рис. 10).

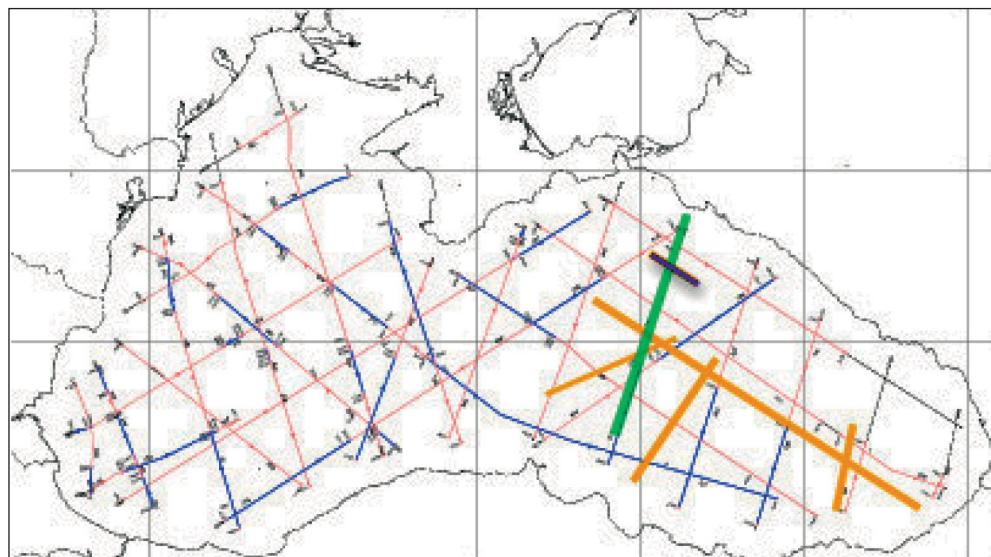


Рис. 8. 2Д-метод отраженных волн общей глубинной точки исследования с длинной косой (10 км) на судне «Мезень» (красные и синие линии), профиль с донными станциями ИОАН 2004 (пять постановок донных станций) — фиолетовая линия, профили 2005 г. (82 постановки донных станций) — желтые линии

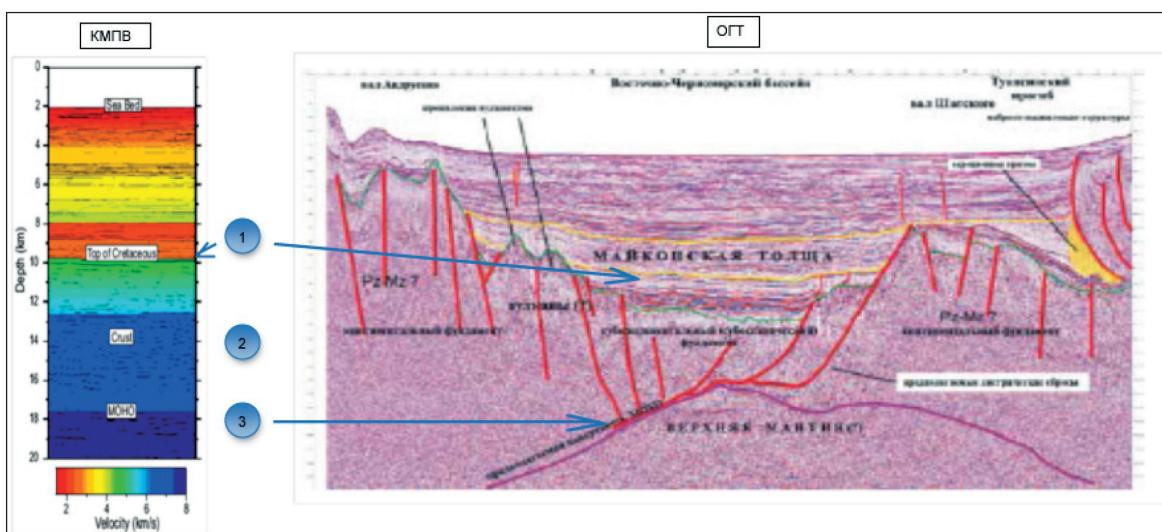


Рис. 9. Сравнение данных метода отраженных волн общей глубинной точки и комплексного метода преломленных волн по профилю в Черном море

Донные наблюдения дополнительно к данным с длинной буксируемой косы (10 км) дают следующую информацию:

1. Определена зона пониженных скоростей перед кровлей Мела, не выявленная по данным ОГТ.
2. Получена тонкая консолидированная океаническая кора (только 5 км толщины).
3. Доказано более мелкое залегание границы Мохоровичича — 18 км, ранее давались оценки в 24 км, эта граница плохо и неопределенно прослеживается на разрезе ОГТ, ее приходится определять на этапе интерпретации.

Для поисков источников глубинной нефти и определения природы ее происхождения предлагаются провести донную съемку по системе региональных профилей Международной исследовательской программы 2011 г., выполненных с длинной косой, равной 10 км. Кроме того, пред-

лагается продолжить региональные длинные профиля с донными регистраторами выполненные в 2005 г. в Восточно-Черноморской котловине Институтом океанографии Саутгемптонского университета Великобритании [13]–[15]. Работы на длинных региональных профилях по изученным 2Д судном линиям дадут возможность:

– получить надежную скоростную модель для *P*- и *S*-волн и тем самым дать более точное положение глубинных осадочных слоев, поверхности и морфологии кристаллического фундамента и Мохо;

– по различиям в скоростных разрезах и поведению морфологии границ выделить типы коры для Черного моря, основные глубинные элементы, имеющие определяющие значение для восстановления истории развития и формирования современной коры Черного моря.

Основной проблемой, возникающей при обосновании стратиграфической привязки мезозойских горизонтов в пределах Российского сектора Черного моря, является отсутствие скважинных данных, а также сложность прямой передачи стратификации от скважин, пробуренных на суше, обусловленная отсутствием сейсмических профилей в переходной зоне суши – моря. Донные станции могут заполнить этот пробел, так как у них нет ограничений, связанных с работой на малой и предельно малой глубине, и выполнить работы по технологии МОВ ОГТ в переходной зоне для связи морских данных с сухопутными скважинами.

Выделяемый в разрезе вала Шатского (в районе структуры Палласа) Келловей-Верхнеюрский сейсмостратиграфический подкомплекс по кинематическим и динамическим характеристикам близок как к надвинутому с севера мел-палеогеновому флишевому комплексу Анапского выступа, так и к подстилающим его нижнесреднеюрским породам переходного метаморфизованного комплекса. Наиболее надежным способом определения его литотипа является скоростной анализ с использованием данных преломленных и закритически отраженных волн, полученных на длинных профилях, пересекающих эту структуру вдоль и поперек оси вала Шатского. Данные, полученные с помощью донных станций, позволят решить эту проблему.

Кроме того, выполнение работ с донными станциями на длинных профилях позволит решить следующие актуальные задачи изучения геологического строения Черного моря:

1. Определить глубину залегания кристаллического фундамента на валу Шатского и в Туапсинском прогибе на длинных профилях с донными регистраторами, проследить морфологию поверхности фундамента, определить скорость поперечных и продольных волн в нижней части осадочного чехла и в фундаменте, уточнить толщину коры.

2. Прояснить генезис образования Восточно-Черноморской впадины. На современных палеотектонических реконструкциях вал Шатского, уже начиная с байосского времени (171 млн лет), соприкасался непосредственно с понтидами южного берега Черного моря. Осадочные горизонты, соответствующие этому геологическому времени, являются последними видимыми отражениями на разрезах, полученных с помощью буксируемых кос. Исследования с донными станциями позволят продлить известную геологическую историю в более раннее время, а также полнее использовать аналогии в строении турецкого сектора Черного моря для прогнозирования нефтегазоносности Российского сектора и поисков глубинных источников нефти.

3. Дать более определенную датировку осадков нижней части осадочного чехла, так как профили с донными станциями 2005 г. проходили через пробуренные скважины, а их продолжение в Российский сектор позволяет привязать новые сейсмические изображения к данным бурения.

4. Определить существование, объем и местоположение продуктов рифтового подплавления в форме подкорковой интрузии или вулканических образований.

5. Определить тип расширения земной коры в центре котловины и направление, относительно которого сопряженные континентальные окраины симметричны.

6. Определить, как расширение коры распределено между верхней и нижней корой.

7. Определить природу утончения земной коры поперек восточной Черноморской котловины и сопряженных с ней континентальных окраин.

8. Определить историю развития напряжений в котловине.

### Заключение (Conclusion)

Таким образом, глубинные работы, выполненные в последнее десятилетие с помощью четырехкомпонентных донных станций, убедительно доказывают возможность исследования глубоких геологических горизонтов, которые недоступны наиболее распространенной в промышленности технологии МОВ ОГТ с буксируемыми косами. Донная аппаратура и технология работы с ней должны быть использованы для получения информации о происхождении углеводородов. Если теория глубинной нефти будет доказана, то это произведет революцию в существующих представлениях о земных запасах энергоносителей. В настоящем исследовании предложен проект изучения глубинного строения котловины Черного моря для решения проблем происхождения глубинной нефти.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0149-2018-0011).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы: Материалы Всероссийской конференции, Москва, 22–25 апреля 2008 г. / Отв. ред. А. Н. Дмитриевский, Б. М. Валеев. — М: ГЕОС, 2008. — 622 с.
2. Павленкова Н. И. Роль глубинных геофизических исследований в решении проблемы дегазации земли и формирования неорганической нефти / Н. И. Павленкова // Глубинная нефть. — 2013. — Т. 1. — № 6. — С. 811–824.
3. Ilinski D. A. Innovation in exploration technologies for Russian shelf / D. A. Ilinski, E. B. Chirkov // RAO/CIS OFFSHORE 2011 PROCEEDINGS. — SPb.: Chimizdat, 2011. — Pp. 150–156.
4. Ilinski D. A. Innovative approach and mobile technology of seismic surveying in tidal flats a hard-to-reach Arctic areas / D. A. Ilinski, A. Y. Razumov, A. A. Korneev, A. M. Rusalin, I. A. Gots // Seismic Equipment. — 2013. — Vol. 49. — No. 2. — Pp. 58–70.
5. Manoj Kumar Bhartee. Wide Angle Reflection-Refraction profiling (WARRP): “An effective tool for subsalt exploration” – A case study/ Manoj Kumar Bhartee, Karad Kapil // 10th Biennial International Conference & Exposition. — Kochin, 2013. — Pp. 1–5.
6. Chandrasekhar N. Challenges of Sub-basalt Mesozoic Exploration of Kerala Konkan offshore area and solutions through Long offset seismic & Sea Bed Node(SBN) data analysis / N. Chandrasekhar, D. K. Panda, K. C. Das, P. Rajappan, P. K. Bhowmick // 10th Biennial International Conference & Exposition. — Kochin, 2013. — Pp. 1–5.
7. Levchenko D. G. Study case of development and field testing of multifunctional cable sea bottom seismic recorder / D. G. Levchenko, L. I. Lobkovskiy, D. A. Ilinski, I. B. Raushenbach, V. V. Ledenev, K. A. Roginskiy // Seismic Equipment. — 2014. — Vol. 50. — No. 4. — Pp. 23–35.
8. Patent US 7,110,323 B2. Method, system and apparatus for interpreting seismic data using duplex waves / N. Marmalyevskyy, Z. Gornjak, A. Kostyukevych, V. Mershchiy, Y. Roganov. — 2006.
9. Patent US 8,472,674 B2. Method of seismic imaging using both reflecting and transmitted waves / N. Marmalyevskyy, Z. Gornjak, A. Kostyukevych, V. Mershchiy, Y. Roganov. — 2013.
10. Claerbout J. F. Fundamentals of geophysical data processing (with application to petroleum prospecting). — New York McGraw-Hill Book Co., Inc., 1976. — 274 p.
11. Амелин Н. Геология без границ: новые данные о региональной геологии Черного моря / Н. Амелин, М. Леончик, Е. Петров, Б. Сенин // Oil & Gas Journal Russia. — 2014. — № 12. — С. 44–49.
12. Black SeaSPAN [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Brochures%20and%20Data%20Sheets/Data%20Sheets/Data%20Library/DS\\_GEO\\_Black\\_SeaSPAN.pdf](http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Brochures%20and%20Data%20Sheets/Data%20Sheets/Data%20Library/DS_GEO_Black_SeaSPAN.pdf) (дата обращения: 28.08.2018).
13. Minshull T. A. Seismic Data Reveal Eastern Black Sea Basin Structure / T. A. Minshull, N. J. White, R. A. Edwards, D. J. Shillington, C. L. Scott, A. Demirer, M. Shaw-Champion, S. M. Jones, M. Erduran, T. Beşevli, G. Coskun, K. Raven, A. Price, B. Peterson // Eos, Transactions American Geophysical Union. — 2005. — Vol. 86. — Is. 43. — Pp. 413–419. DOI: 10.1029/2005EO430001.
14. Scott C. L. Wide-angle seismic data reveal extensive overpressures in the Eastern Black Sea Basin / C. L. Scott, D. J. Shillington, T. A. Minshull, R. A. Edwards, P. J. Brown, N. J. White // Geophysical Journal International. — 2009. — Vol. 178. — Is. 2. — Pp. 1145–1163. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04215.x.

15. Shillington D. J. Cenozoic evolution of the eastern Black Sea: A test of depth-dependent stretching models / D. J. Shillington, N. White, T. A. Minshull, G. R. H. Edwards, S. M. Jones, R. A. Edwards, C. L. Scott // Earth and Planetary Science Letters. — 2008. — Vol. 265. — Is. 3–4. — Pp. 360–378. DOI: 10.1016/j.epsl.2007.10.033.

## REFERENCES

1. Dmitrievskii, A. N., and B. M. Valyaev, eds. *Degazatsiya Zemli: geodinamika, geoflyuidy, neft', gaz i ikh paragenezisy: Materialy Vse-rossiiskoi konferentsii*, Moskva, 22–25 aprelya 2008 g. M: GEOS, 2008.
2. Pavlenkova, Ninel Ivanovna. “The role of deep geophysical studies in the earth’s degassing and deep oil generation problem solution.” *Deep oil* 1.6 (2013): 811–824.
3. Ilinski, D. A., and E. B. Chirkov. “Innovation in exploration technologies for Russian shelf.” *RAO/CIS OFFSHORE 2011 PROCEEDINGS*. SPb.: Chimizdat, 2011. 150–156.
4. Ilinski, D. A., A. Y. Razumov, A. A. Korneev, A. M. Rusalin, and I. A. Gots. “Innovative approach and mobile technology of seismic surveying in tidal flats a hard-to-reach Arctic areas.” *Seismic Equipment* 49.2 (2013): 58–70.
5. Manoj Kumar Bhartee, and Karad Kapil. “Wide Angle Reflection-Refraction profiling (WARRP): “An effective tool for subsalt exploration” – A case study.” *10th Biennial International Conference & Expo-sition*. Kochin, 2013. 1–5.
6. Chandrasekhar, N., D. K. Panda, K. C. Das, P. Rajappan, and P. K. Bhowmick. “Challenges of Sub-basalt Mesozoic Exploration of Kerala Konkan offshore area and solutions through Long offset seismic & Sea Bed Node(SBN) data analysis.” *10th Biennial International Conference & Exposition*. Kochin, 2013. 1–5.
7. Levchenko, D. G., L. I. Lobkovskiy, D. A. Ilinski, I. B. Raushenbach, V. V. Ledenev, and K. A. Roginskiy. “Study case of development and field testing of multifunctional cable sea bottom seismic recorder.” *Seismic Equipment* 50.4 (2014): 23–35.
8. Marmalyevskyy, N., Z. Gornjak, A. Kostyukevych, V. Mershchiy, and Y. Roganov. Method, system and apparatus for interpreting seismic data using duplex waves. Patent US 7,110,323 B2. 2006.
9. Marmalyevskyy, N., Z. Gornjak, A. Kostyukevych, V. Mershchiy, and Y. Roganov. Method of seismic imaging using both reflecting and transmitted waves. Patent US 8,472,674 B2. 2013.
10. Claerbout, Jon F. *Fundamentals of geophysical data processing (with application to petroleum prospecting)*. New York McGraw-Hill Book Co., Inc., 1976.
11. Amelin, Nikolai, Mikhail Leonchik, Evgenii Petrov, and Boris Senin. “Geologiya bez granits: novye dannye o regional’noi geologii Chernogo morya.” *Oil & Gas Journal Russia* 12 (2014): 44–49.
12. Black SeaSPAN. Web. 28 Aug. 2018 [http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Brochures%20and%20Data%20Sheets/Data%20Sheets/Data%20Library/DS\\_GEO\\_Black\\_SeaSPAN.pdf](http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Brochures%20and%20Data%20Sheets/Data%20Sheets/Data%20Library/DS_GEO_Black_SeaSPAN.pdf).
13. Minshull, T. A., N. J. White, R. A. Edwards, D. J. Shillington, C. L. Scott, A. Demirer, M. Shaw-Champion, S. M. Jones, M. Erduran, T. Besevli, G. Coskun, K. Raven, A. Price, and B. Peterson. “Seismic data reveal eastern Black Sea Basin structure.” *Eos, Transactions American Geophysical Union* 86.43 (2005): 413–419. DOI: 10.1029/2005EO430001.
14. Scott, C. L., D. J. Shillington, T. A. Minshull, R. A. Edwards, P. J. Brown, and N. J. White. “Wide-angle seismic data reveal extensive overpressures in the Eastern Black Sea Basin.” *Geophysical Journal International* 178.2 (2009): 1145–1163. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04215.x.
15. Shillington, Donna J., Nicky White, Timothy A. Minshull, Glyn R. H. Edwards, Stephen M. Jones, Rosemary A. Edwards, and Caroline L. Scott. “Cenozoic evolution of the eastern Black Sea: A test of depth-dependent stretching models.” *Earth and Planetary Science Letters* 265.3-4 (2008): 360–378. DOI: 10.1016/j.epsl.2007.10.033.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ильинский Дмитрий Анатольевич** —  
 кандидат физико-математических наук,  
 ведущий научный сотрудник  
 Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
 117997, Российская Федерация, г. Москва,  
 Нахимовский проспект, д. 36  
 e-mail: [dilinski@ifz.ru](mailto:dilinski@ifz.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ilinskiy, Dmitry A.** —  
 PhD, Senior Research Scientist  
 Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy  
 of Sciences  
 36, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117997,  
 Russian Federation  
 e-mail: [dilinski@ifz.ru](mailto:dilinski@ifz.ru)

**Рогинский Константин Александрович** —  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН  
117997, Российская Федерация, г. Москва,  
Нахимовский проспект, 36  
e-mail: [roginskiy@list.ru](mailto:roginskiy@list.ru)  
**Ганжа Олег Юрьевич** —  
главный специалист  
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
117997, Российская Федерация, г. Москва,  
Нахимовский проспект, 36  
e-mail: [ganzaoy@mail.ru](mailto:ganzaoy@mail.ru)

**Roginskiy, Konstantin A.** —  
PhD, Senior Research Scientist  
Shirshov Institute of Oceanology  
Russian Academy of Sciences  
36, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117997,  
Russian Federation  
e-mail: [roginskiy@list.ru](mailto:roginskiy@list.ru)  
**Ganza, Oleg Y.** —  
Chief Specialist  
Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy  
of Sciences  
36, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117997,  
Russian Federation  
e-mail: [ganzaoy@mail.ru](mailto:ganzaoy@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 10 сентября 2018 г.*

*Received: September 10, 2018.*