

МЕТОД СОГЛАСОВАННОГО ПОВЕДЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ И АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ВЕДЕНИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Л. А. Мартынова^а, доктор техн. наук, старший научный сотрудник
^аАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: традиционное использование для сейсморазведки стационарных геофонов, прикрепляемых к дну, затратно и малоэффективно. Размещение геофонов на автономных обитаемых подводных аппаратах позволяет частично автоматизировать сейсморазведку, перейдя от статической схемы использования геофонов для прослушивания отраженных сигналов, создаваемых излучателем, к динамической. При динамической схеме группа автономных обитаемых подводных аппаратов постепенно перемещается вместе с излучателем, при этом основная часть геофонов занята приемом отраженного сигнала, а остальная часть — перемещением вместе с автономными обитаемыми подводными аппаратами в новое место, что существенно сокращает время ведения сейсморазведки. Однако при этом возникает проблема согласованного поведения группы автономных обитаемых подводных аппаратов с движением излучателя. **Цель исследования:** разработка метода согласованного поведения группы автономных обитаемых подводных аппаратов и излучателя при ведении сейсморазведки. **Результаты:** разработан метод координации движения излучателя и поступательного движения группы автономных обитаемых подводных аппаратов, при котором излучатель, двигаясь по смещающейся круговой траектории, постоянно описывает окружность вокруг положения перемещающейся группы автономных обитаемых подводных аппаратов. На основе специально разработанной математической модели найдены оптимальные значения параметров согласованного движения излучателя и группы автономных обитаемых подводных аппаратов, которые позволили обеспечить наиболее широкий диапазон азимутов направлений прихода отраженных сигналов, создаваемых излучателем. **Практическая значимость:** применение динамической схемы использования геофонов приводит к существенному сокращению времени на проведение сейсморазведки в заданном районе по сравнению с использованием статической схемы, а также значительно возрастает подвижность всей системы «группа автономных обитаемых подводных аппаратов — излучатель», а значит, и возможность оперативного изменения параметров согласованного движения в зависимости от сложившейся при ведении сейсморазведки ситуации.

Ключевые слова — автономный обитаемый подводный аппарат, метод согласованного поведения, азимуты, среднеквадратическое отклонение.

Введение

Поиску залежей углеводородов в морском дне в настоящее время уделяется повышенное внимание, особенно в Арктических районах [1–3].

При поиске залежей углеводородов основными задачами являются:

- обнаружение месторождения углеводородов;
- локализация его положения.

Арктические территории покрыты льдом, что делает невозможным использование ряда широко известных методов разведки углеводородов, например, с применением сейсмокос. Поэтому наиболее целесообразным в ледовых условиях способом считается сейсморазведка с использованием геофонов, прикрепленных к дну [4–13]. Однако указанный способ является трудоемким и чрезмерно продолжительным, поскольку большая часть времени затрачивается на подготовительные работы, включающие следующие операции:

- распределение геофонов по морской поверхности;
- опускание геофонов на морское дно;
- прикрепление геофонов к дну с определенной их ориентацией;

- позиционирование геофонов;
- всплытие геофонов после проведения измерений;
- сбор по поверхности моря всплывших геофонов.

В настоящее время предпринимаются попытки автоматизировать часть перечисленных мероприятий, например, осуществлять самопогружение геофонов с укладыванием на дно и всплытие без внешней помощи в заданный момент времени [14–16]. Другим вариантом совершенствования сейсморазведки месторождений углеводородов является автоматизация перемещения геофонов путем помещения каждого геофона в корпус автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА) [17, 18].

Помещение каждого геофона в корпус АНПА открывает широкие возможности формирования динамической системы ведения сейсморазведки залежей углеводородов, поскольку геофон с АНПА может самостоятельно всплывать на заданную глубину, перемещаться в указанную точку и опускаться на дно для прослушивания отраженных сигналов, создаваемых специальным излучателем-вибратором (далее по тексту — излучатель). Поскольку для ведения сейсморазведки

необходимо несколько геофонов, то формируется группа АНПА. При этом эффективное ведение сейсморазведки возможно только при согласованных действиях излучателя и группы АНПА, которые в свою очередь обеспечиваются оптимальным выбором параметров их взаимного функционирования.

Целью настоящей работы является разработка метода согласованного поведения излучателя и группы АНПА и определение параметров метода, обеспечивающих эффективное ведение сейсморазведки в заданном районе.

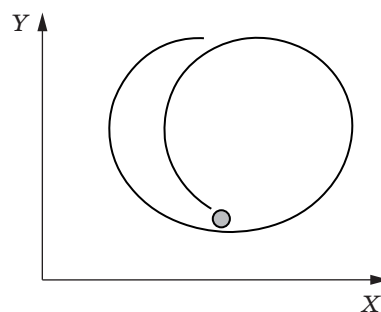
Для достижения цели в работе были решены следующие задачи:

- обоснована оптимальная траектория движения излучателя;
- предложена оптимальная эффективная схема перемещения группы АНПА с геофонами на борту;
- определены параметры согласованного функционирования излучателя и группы АНПА;
- определены параметры метода, обеспечивающие эффективную сейсморазведку в заданном районе, на основании результатов проведенных исследований и численных экспериментов.

Описание предлагаемого метода согласованного функционирования излучателя и группы АНПА

Поиск донных месторождений углеводородов проводится следующим образом. В заданном районе прикрепляются к дну геофоны в точках, расположенных в узлах условной сетки, покрывающей дно заданного района. Вблизи донной поверхности осуществляется перемещение излучателя, зондирующего донную поверхность импульсными сигналами. Частоты излучаемых сигналов согласованы с особенностями отражения сигналов залежами углеводородов. Геофоны, каждый из которых расположен в АНПА, принимают отраженные сигналы от залежей углеводородов в придонном слое. По разности моментов времени приема геофонами отраженных сигналов определяется местоположение залежей углеводородов.

Из литературы известно, что для повышения точности определения местоположения залежей углеводородов наиболее целесообразно перемещение излучателя по круговым траекториям (циклоидам) [19, 20] (рис. 1). Так, при исследовании точности метода в зависимости от траектории движения излучателя относительно АНПА показано, что траектория движения излучателя должна быть такой, чтобы курсовые углы излучателя относительно АНПА в моменты времени измерения отраженного сигнала периодически меняли борт и изменялись в возможно широких пределах [20]. Переход от прямолинейного дви-



■ *Рис. 1.* Внешний вид круговой траектории движения излучателя (по циклоиде)

жения по параллельным направлениям к круговому движению излучателя при обследовании заданного района способствует повышению широкоазимутальности направлений отраженных сигналов. Широкоазимутальная сейсморазведка гарантирует получение данных в широком диапазоне направлений сейсмических лучей. Опыт показал [20], что этот метод обеспечивает более качественное освещение разреза, более высокое соотношение сигнал/помеха и лучшую разрешающую способность сейсмоземки в сложных геологических условиях, например, в пластах, подстилающих соляные тела сложной формы. Указанные факторы оказывают существенное влияние на точность позиционирования месторождений углеводородов.

Использование традиционной схемы со стационарными геофонами, при которой сначала все геофоны опускаются и прикрепляются к дну, затем следует процесс приема и регистрации отраженного сигнала, затем — синхронное всплытие всех геофонов и их перемещение в новые позиции для следующего приема отраженных сигналов, приводит к тому, что часть времени расходуется на выполнение технологических операций с геофонами: открепление от дна, перемещение, прикрепление к дну, определение собственного местоположения, подготовку к приему отраженного сигнала.

В настоящей работе предлагается метод поиска залежей углеводородов, основанный на использовании преимуществ АНПА по сравнению со стационарными геофонами, а именно способности их свободно перемещаться, причем независимо друг от друга.

Предлагаемый метод согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА заключается в следующем. В то время как большая часть АНПА из группы прикреплена к дну и принимает отраженный сигнал, создаваемый излучателем, другая часть АНПА перемещается для занятия новой позиции, не участвуя при этом в приеме отраженных сигналов. После занятия новой позиции прием отра-

женных сигналов осуществляет группа АНПА в обновленном составе, при этом часть АНПА, не задействованная в приеме отраженного сигнала, осуществляет перемещение в места новой своей дислокации. Тем самым достигается динамичность функционирования всей системы в целом и непрерывность ведения сейсморазведки.

Определение параметров метода

Очевидно, что использование метода согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА подразумевает тщательную координацию действий излучателя и группы АНПА.

Математически сказанное означает следующее.

1. Если предположить, что скорость перемещения группы — $V_{гр}$, то скорость перемещения центра окружности $V_{ц}$, вдоль которой происходит круговое вращение излучателя, определяется равенством скоростей:

$$V_{ц} = V_{гр}.$$

2. Угловая скорость $\Delta\alpha$ движения излучателя по окружности радиуса R описывается выражением

$$\Delta\alpha = \frac{V_{изл.}}{R}.$$

3. Скорость движения группы АНПА определяется количеством рядов АНПА, которые последовательно перемещаются. При этом диапазон изменения скорости движения группы в зависимости от количества перемещаемых рядов определяется выражением

$$V_{гр} = \frac{N}{M} V_{ц},$$

где N — количество задействованных рядов АНПА при перемещении; M — общее количество рядов АНПА в группе вдоль направления перемещения.

Приведенные параметры являются основополагающими в методе согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА при ведении сейсморазведки и практически не зависят друг от друга.

В то же время на их значения могут быть наложены существенные ограничения, например, из-за мощности излучателя, оказывающей влияние на дальность приема геофонами отраженных сигналов.

Предельная дальность приема отраженных сигналов ставит ограничения, с одной стороны, на размеры группы, поскольку излучателю целесообразно осуществлять движение вдоль окруж-

ности, геометрически описывающей положение группы, а с другой стороны, на радиус окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, по указанным выше причинам.

Из-за ограничений по дальности приема отраженных сигналов может оказаться, что размер обследуемой зоны (назовем ее локальной зоной) существенно меньше размеров заданного района. В этом случае сейсморазведку необходимо вести путем поэтапного обследования локальных зон, просматривая последовательно зоны одну за другой. При этом возникает ряд дополнительных параметров, которые наряду с перечисленными выше также необходимо оптимизировать. Дополнительными параметрами являются:

- количество локальных зон;
- последовательность осмотра локальных зон;
- совокупное время, затрачиваемое на осмотр локальных зон.

Рассмотрим причины выбора значений перечисленных параметров метода согласованного поведения излучателя и группы АНПА.

На скорость движения группы АНПА влияние оказывает размер группы, характеризуемый:

- дистанцией между рядами АНПА вдоль осей X и Y ;

- количеством АНПА в ряду;
- количеством рядов в группе;
- топологией размещения АНПА в группе.

Во многом параметры группы определяются ограничениями, наложенными на АНПА. С одной стороны, при движении группы должен быть обеспечен бесстолкновительный режим движения АНПА, что лимитирует дистанцию сближения АНПА друг с другом. С другой стороны, для поддержания возможности обмена информацией АНПА друг с другом (по крайней мере — с ближайшим) дистанция расхождения двух АНПА между собой не должна превышать некоторого допустимого значения.

Геометрическая протяженность группы вдоль осей X и Y определяется соотношениями

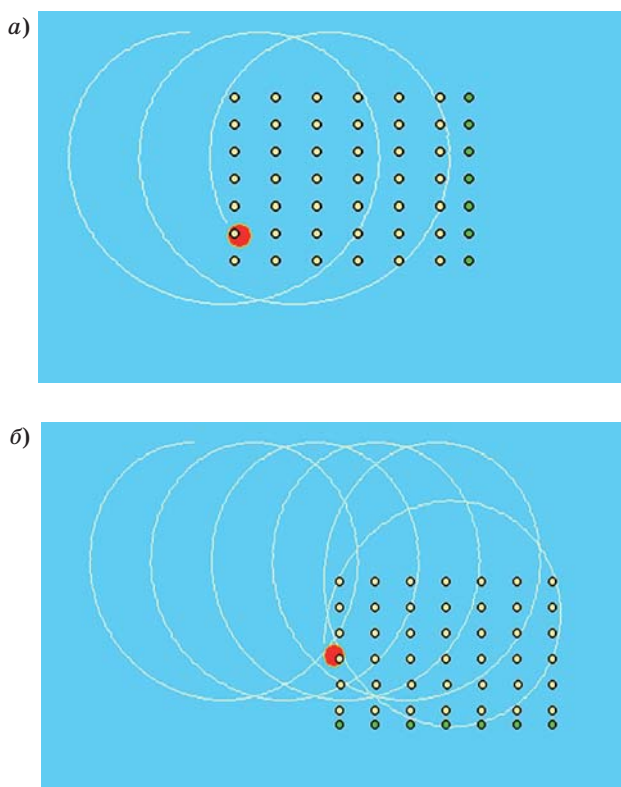
$$L_x = M_x \cdot \Delta X; L_y = M_y \cdot \Delta Y,$$

где L_x, L_y — протяженность группы вдоль осей X и Y ; M_x, M_y — количество АНПА в ряду вдоль осей X и Y .

Тогда траектория, вдоль которой происходит движение излучателя, является окружностью, описанной вокруг группы, и ее радиус R определяется выражением

$$R = \frac{\sqrt{2}}{2} L,$$

где L — максимальная геометрическая протяженность группы в одном из направлений X и Y :
 $L = \max\{L_x, L_y\}.$



■ **Рис. 2.** Начальный и промежуточный моменты согласованного движения излучателя и группы АНПА: последовательное перемещение группы АНПА прямолинейно (а) и с изменением направления поворотом группы направо (б)

На скорость перемещения группы АНПА влияние оказывают:

- технологические возможности и временные ограничения, необходимые на выполнение технологических операций по размещению геофонов;
- ограничения на параметры перемещения излучателя и его функционирования.

Условия координации движения излучателя и группы АНПА находятся в некотором противоречии друг с другом, поскольку определяются, с одной стороны, непрерывностью ведения сейсморазведки, что обеспечивает безусловный экономический эффект функционирования всей системы в целом, а с другой стороны, необходимостью в течение некоторого времени удерживать в неподвижном положении АНПА, прикрепленные к дну, для прослушивания отраженных сигналов.

Параметрами, оказывающими влияние на траекторию перемещения излучателя, являются:

- радиус окружности, вдоль которой происходит вращение излучателя;
- линейная скорость движения излучателя вдоль окружности;

- параметры траектории перемещения центра окружности;

- скорость перемещения центра окружности.

Относительно движения центра окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, необходимо отметить, что излучатель может перемещаться по более сложной траектории, чем прямая линия (при циклоиде), если это будет оправдано эффективностью функционирования всей системы в целом.

Выбор параметров метода согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА при ведении сейсморазведки основан на обеспечении координированного поведения излучателя и группы АНПА (рис. 2, а и б).

Для определения оптимальных параметров метода согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА необходимо установить показатели, на основе которых осуществляется выбор оптимальных параметров.

Показатели, по которым осуществляется выбор параметров метода

Одним из важнейших показателей, положенных в основу выбора параметров метода, является широкоазимутальность прихода отраженных сигналов, оказывающая, в свою очередь, влияние на точность определения местоположения залежей углеводородов. Поэтому выбор параметров системы ведения сейсморазведки осуществлялся на основе оценки степени широкоазимутальности, выраженной отклонением полученных значений азимутов от равномерного распределения азимутов в диапазоне $[0, 360^\circ]$. Степень отклонения выражена среднеквадратическим отклонением (СКО) азимутов от среднего их значения по результатам полного цикла измерений в ходе проведения численного эксперимента.

Расчет средних значений азимутов производится по формуле

$$MO = \frac{\sum_{i=1}^M Az_i}{M}.$$

Здесь M — количество АНПА в группе, означающее, что в каждый i -й момент времени поступает M азимутов для обработки.

С течением времени происходит накопление азимутов по каждому из АНПА:

$$Az_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{i_time} Az_j,$$

где i_time — текущий момент времени; Az_{Σ} — накопленное за период времени до i_time количество азимутов по каждому из i направлений.

Среднеквадратическое отклонение азимутов в каждый момент времени определяется с учетом накоплений по каждому из направлений следующим выражением:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{(Az_i - Az_{MO})^2}{M}}, \quad i=1, i_time.$$

По результатам совокупности всех измерений в процессе проведения численного эксперимента определяется среднее значение СКО азимутов

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_i}{K}, \quad i=1, i_time,$$

где K — количество моментов измерений.

Далее проводится оценка количества локальных зон, покрывающих заданный район ведения сейсморазведки. При этом учитываются:

- степень покрытия локальными зонами всего заданного района;
- степень перекрытия локальных зон друг другом.

В качестве исходных данных использовались размеры локальной зоны ведения сейсморазведки, полученные при определении оптимальных значений параметров метода согласованного поведения излучателя и группы АНПА.

Выбор наилучшей схемы последовательности обследований локальных зон определялся из условия максимально возможного покрытия площади заданного района локальными зонами при минимальном количестве перекрытий локальными зонами друг друга.

Количество локальных зон вдоль осей X и Y определяется соотношениями

$$N_x = \frac{L_x \text{ района}}{L_x}; \quad N_y = \frac{L_y \text{ района}}{L_y},$$

где $L_x \text{ района}$ и $L_y \text{ района}$ — размеры района вдоль осей X и Y соответственно.

Определение параметров метода согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА осуществляется по результатам численного эксперимента путем моделирования согласованного функционирования излучателя и группы АНПА.

Определение оптимальных параметров метода

Выбор оптимальных параметров метода согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА осуществлялся в два этапа.

На первом этапе были проведены исследования влияния радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, на степень равно-

мерности распределения азимутов направлений прихода отраженных сигналов. Маршрут движения системы «группа АНПА — излучатель» был построен таким образом, чтобы указанная система описала замкнутый контур в виде прямоугольника. Изменение направления движения группы АНПА происходило за счет изменения формирования ряда той части АНПА, которая осуществляет переход в точки следующей дислокации. В результате предложенной схемы осуществлялся полный обход локальной зоны с приведением группы АНПА в положение, в точности соответствующее стартовому. Реализация замкнутого контура позволяет получить более объективные результаты распределения азимутов направлений прихода отраженного сигнала по сравнению с прямолинейным движением группы АНПА.

По результатам численного эксперимента определялся оптимальный радиус окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя. Значение радиуса позволяет определить размер локальной зоны, в пределах которой происходит движение группы АНПА по замкнутому контуру.

На втором этапе исследований с использованием размеров локальной зоны в качестве исходных данных была проведена оценка количества локальных зон, покрывающих заданный район ведения сейсморазведки, а также определена оптимальная последовательность поиска в локальных зонах. Кроме того, определено рациональное поведение группы АНПА для эффективного ведения сейсморазведки по всей площади заданного района.

При проведении исследований были приняты следующие исходные данные:

по району: рассматривался заданный район 1000×1000 м;

по группе:

- количество АНПА в группе — 49 ед.;
- количество рядов — 7, в каждом ряду по 7 ед.;
- расстояние между АНПА вдоль оси X : $\Delta X = 30$ м, вдоль оси Y : $\Delta Y = 20$ м;
- скорость перемещения группы АНПА определялась количеством рядов группы, перемещающихся вдоль направления движения группы.

Относительно перемещения излучателя принималось, что центр окружности в точности совпадал с геометрическим «центром масс» группы.

Предполагалось, что за время перемещения одиночного ряда АНПА остальная (большая) часть АНПА успевала выполнить последовательно операции заглужения и опускания на дно, прикрепления к дну, позиционирования, приема отраженных сигналов и их регистрации на карту памяти, всплытия и подготовки к дальнейшему перемещению в точку новой дислокации.

В ходе проведения исследований была выполнена серия численных экспериментов, при этом в каждом эксперименте значение радиуса окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, принималось постоянным. Для каждого значения радиуса проводился численный эксперимент, в ходе которого система «группа АНПА — излучатель» описывала полный контур в виде прямоугольника. Значение радиуса варьировалось от 10 до 200 м с шагом 10 м.

На первом этапе проведения исследований при выборе параметров метода согласованного поведения излучателя и группы АНПА ограничения по дальности приема отраженных сигналов не учитывались. В ходе проведения серии численных экспериментов было определено влияние радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, на СКО азимутов (рис. 3).

Из результатов исследований видно следующее.

1. Изменение радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, оказывает влияние на степень широкоазимутальности, выраженной СКО азимутов.

2. С увеличением радиуса окружности СКО азимутов монотонно убывает от 1100 до 180 и достигает минимальной отметки при $R = 100$ м. Дальнейшее увеличение радиуса приводит к увеличению СКО до 380, зафиксированного при $R = 200$ м.

Результаты численного эксперимента показали, что существует оптимальное значение радиуса, при котором СКО азимутов достигает наименьшего значения. Это значение радиуса соответствует окружности, близкой к окружности, описанной вокруг группы АНПА с центром в геометрическом «центре масс» АНПА. Однако, как отмечалось выше, при проведении численного эксперимента ограничения на дальности приема отраженного сигнала не учитывались.

В то же время на практике может оказаться, что мощности излучателя недостаточно для обеспечения полученных дальностей или чувствитель-

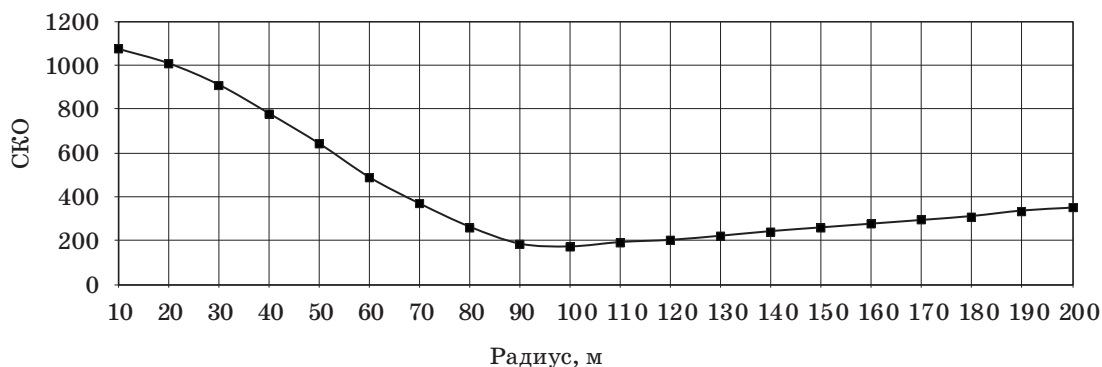
ность геофонов не позволяет различить сигналы, близкие по уровню к шумам окружающей среды. Все это требует учета дальности при проведении исследований. Поэтому далее при тех же самых исходных данных учитывались дальности приема отраженных сигналов следующим образом. Перед проведением эксперимента задавалось предельное значение дальности приема отраженного сигнала. Затем при последовательном изменении радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, проводилась серия численных экспериментов, в ходе которых определялись азимуты, как и в предыдущих экспериментах. Однако на этот раз если оказывалось, что дальность превышает предельное значение, то эти азимуты исключались из статистической обработки результата. Тем самым определялся «вклад» азимутов с повышенной дальностью в общий результат.

По результатам серии экспериментов строился график, аналогичный приведенному на рис. 3. Затем в следующей серии значение предельной дальности менялось, и вновь проводилась серия численных экспериментов с изменением радиуса окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, от 10 до 200 м с шагом 10 м.

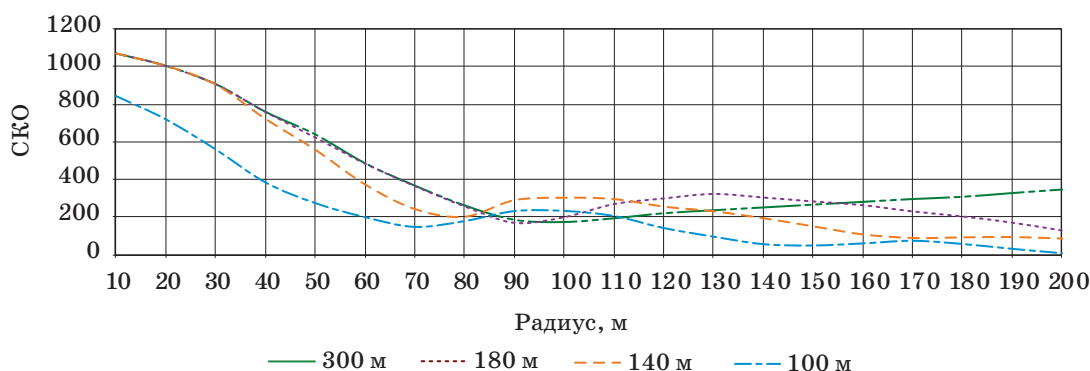
В результате проведения нескольких серий численных экспериментов были определены зависимости влияния радиуса окружности при учете четырех вариантов дальности приема отраженных сигналов (рис. 4) и сделаны следующие выводы.

1. Учет ограничений по дальности приема отраженных сигналов оказывает влияние на СКО азимутов. Так, при уменьшении предельной дальности приема отраженных сигналов от 300 до 100 м снижение по СКО азимутов в среднем произошло на 200.

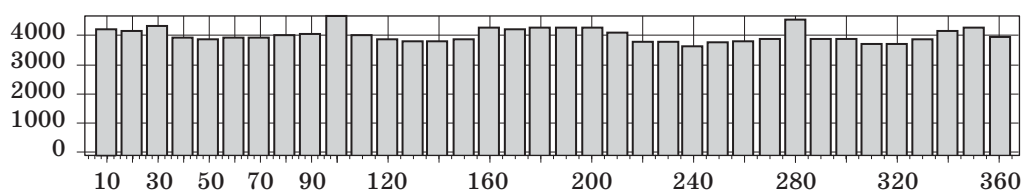
2. Незначительное снижение предельной дальности приема отраженных сигналов, например от 300 до 180 м, приводит к снижению СКО азимутов на больших радиусах — только после 90 м. При этом минимум на радиусе 100 м сохраняется. В дальнейшем наблюдается более интенсивный



■ Рис. 3. Зависимость СКО азимутов от радиуса окружности, вдоль которой происходит вращение излучателя



■ **Рис. 4.** Зависимость SKO от радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, с учетом ограничений по дальностям приема отраженных сигналов

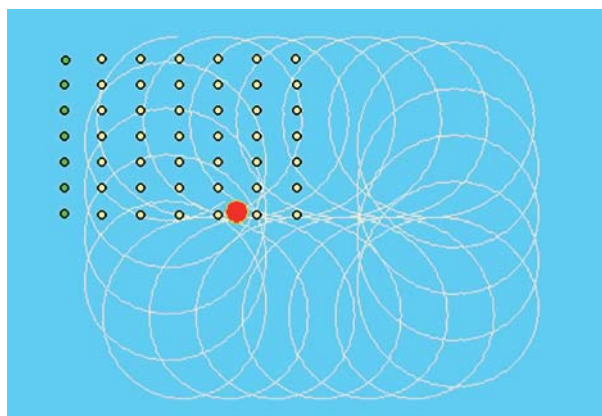


■ **Рис. 5.** Гистограмма распределения азимутов при предельной дальности 100 м

рост SKO азимутов по сравнению с вариантом 300 м, поскольку та часть азимутов, которая способствовала выравниванию азимутов до равномерного распределения и тем самым снижению SKO, была исключена из рассмотрения по причине дальности, превышающей предельное значение. Однако после отметки 130 м наблюдается еще одна точка перегиба, и с дальнейшим увеличением радиуса SKO азимутов начинает снижаться. Объяснить это можно тем, что с ростом радиуса в целом происходит увеличение SKO, однако из-за превышения предельной дистанции из рассмотрения исключается та часть азимутов, которая способствует увеличению SKO азимутов.

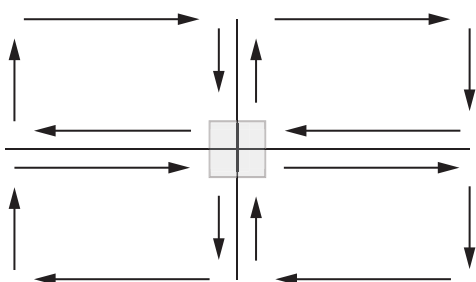
3. Схожий характер зависимости SKO азимутов от радиуса окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, наблюдается при дальнейшем снижении предельной дальности приема отраженных сигналов. При этом положение минимума SKO азимутов смещается: при дистанции 100 м оно составило 70, при дистанции 140 м — 80, при дистанции 180 м — 90, при дистанции 300 м (так же как и при безграничном случае) — 100.

4. При рассмотрении гистограммы распределения азимутов (рис. 5) выявлено, что наименьшее значение SKO азимутов наблюдается при ограничении по дальности 100 м и составляет 148 (см. рис. 4). В этом случае траектория перемещения излучателя вокруг группы АНПА выглядит следующим образом (отображена светлой линией на рис. 6).



■ **Рис. 6.** Зависимость SKO от радиуса окружности, вдоль которой происходит вращение излучателя

Таким образом, результаты проведенных численных экспериментов показали, что для обеспечения эффективного ведения сейсморазведки необходимо согласованно подбирать мощность излучателя и чувствительность геофонов для обеспечения дальности приема отраженных сигналов с учетом радиуса обхода группы АНПА. Приведенные расчеты показывают целесообразность использования оптимальных параметров метода согласованного функционирования излучателя и группы АНПА с учетом ограничений, накладываемых на радиус окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, в свя-



■ **Рис. 7.** Схема ведения сейсморазведки в заданном районе путем последовательного обследования локальных зон

зи с ограничением по дальности приема отраженных сигналов.

По результатам первого этапа исследований были получены параметры траектории движения излучателя, которые в свою очередь оказывают влияние на размер группы. В целом результаты исследований позволили определить размер локальной зоны, в пределах которой осуществляется наиболее эффективное ведение сейсморазведки. Этим значением является $R = 100$ м, поэтому размеры зоны получились равными 500×500 м.

На втором этапе исследований определялись количество локальных зон и последовательность проведения сейсморазведки в локальных зонах.

Поскольку размер обследуемого района составляет 1000×1000 м, то количество локальных зон, покрывающих заданный район, равно четырем. Поэтому далее при проведении исследований выявлялось оптимальное поведение группы АНПА для эффективного ведения сейсморазведки во всем заданном районе.

Анализ сложившейся ситуации показал, что в целях сокращения времени на обследование заданного района целесообразно просматривать

территорию заданного района поэтапно, путем последовательного перемещения группы АНПА и излучателя из одной локальной зоны в другую, при этом стартовое положение группы при обследовании каждого следующего участка будет иметь начало в точке, совпадающей с точкой окончания сейсморазведки в предшествующей локальной зоне (рис. 7). В этом случае будут отсутствовать временные и материальные затраты на перемещение группы АНПА в точку начала движения в соседней локальной зоне. Излучателю также не придется совершать специальные маневры для перемещения в соседнюю локальную зону.

Одновременно рассчитывалось время, затрачиваемое на сейсморазведку в заданном районе, путем умножения времени, затраченного на сейсморазведку в отдельно взятой локальной зоне, на количество зон в заданном районе.

Заключение

Предложен метод ведения сейсморазведки группой АНПА, отличающийся динамической схемой использования геофонов, прикрепленных к АНПА.

Исследования, направленные на формирование согласованного поведения излучателя и группы АНПА, позволили повысить эффективность ведения сейсморазведки за счет существенного сокращения времени на ее проведение и повышения точности определения положения залежей углеводородов.

Определены параметры метода, обеспечивающие эффективное ведение сейсморазведки в заданном районе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-02928-а).

Литература

1. Фасхутдинов Р. В. Подводные камни морской сейсморазведки // *www.Kogabel.ru*. 2016. Вып. 2. С. 98–106.
2. Лаверов Н. П., Дмитриевский А. Н., Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа России // *Арктика: экология и экономика*. 2011. № 1. С. 25–37.
3. Лаверов Н. П. и др. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации / Н. П. Лаверов, Л. И. Лобковский, А. В. Тулупов, М. А. Воронов, О. Ю. Ганжа // *Арктика: экология и экономика*. 2011. № 4. С. 4–13.
4. Ковачев С. А. и др. Сейсмичность в районе Кравцовского морского нефтегазового месторождения в Балтийском море / С. А. Ковачев, А. А. Крылов, В. Н. Иванов, Г. К. Тимашкевич, Т. А. Ковачева, А. В. Хортов // *Естественные и технические науки*. 2016. № 4. С. 34–40.
5. Крылов А. А. Некоторые аспекты донных сейсмологических исследований и мониторинга на объектах нефтегазовой добычи и транспортировки на шельфе // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2015. № 9. С. 20–25.
6. Крылов А. А., Иващенко А. И., Ковачев С. А. Оценка сейсмической опасности нефтегазоносных шельфовых зон на примере Северного Каспия // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 6. С. 1006–1012.
7. Крылов А. А. Моделирование реакции пористых водонасыщенных верхних осадков морского шельфа на сейсмические воздействия // *Естественные и технические науки*. 2015. № 10. С. 221–223.
8. Левченко Д. Г. Методы и средства измерения параметров океанической среды автоматическими мно-

- гоцелевыми донными станциями // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 2. http://www.ngtr.ru/rub/12/28_2010.pdf (дата обращения: 17.01.2017).
9. Delaney J. R. NEPTUNE: An Interactive Submarine Observatory at the Scale of a Tectonic Plate. Long-Term Observations in the Oceans // ОНП/ION Joint Symp. Japan, 2001. P. 309.
 10. Maultzsch S., Nawab R., Yuh S., et al. An Integrated Multiazimuth VSP Study for Fracture Characterization in the Vicinity of a Well // Geophys Prosp. 2009. Vol. 57. P. 263–274.
 11. Wild P. Practical Application of Seismic Anisotropy // First Break. May 2011. Vol. 29. P. 117–124.
 12. Лаверов Н. П. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4. С. 4–13.
 13. Leurera K. C. Compressional and Shear-wave Velocities and Attenuation in Deep-sea Sediment During Laboratory Compaction // J. Acoust. Soc. Amer. 2004. Vol. 116. N 4. P. 2023–2030.
 14. Пат. 2381530 РФ. Морская автономная донная станция для выполнения геофизических и геолого-разведочных работ / А. И. Машошин, С. В. Жуменков, В. Б. Зиннатов, С. Ю. Ермаков, А. С. Смирнов (РФ). — № 2008124873/28; заявл. 10.06.2008; опубл. 10.02.2010, Бюл. № 4. — 8 с.
 15. Пат. 2438149 РФ. Автономная донная станция для сейсмических наблюдений / И. А. Ильин, П. Г. Бродский, В. С. Аносов, Д. Г. Левченко, Е. Р. Павлюкова, В. П. Леньков, В. В. Чернявец, А. А. Зайцев, А. Л. Гвоздецкий (РФ). — № 2010103093/28; заявл. 29.01.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. — 14 с.
 16. Пат. 2435180 РФ. Подводная геофизическая станция / С. Я. Сукокин, С. В. Белов, А. В. Кошурников, П. Ю. Пушкарев, Н. П. Рыбаков, С. Ю. Чернявец, В. В. Червинчук (РФ). — № 2010113601/28; заявл. 07.04.2010; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33. — 13 с.
 17. Максимов С. В. О применении автономных необитаемых подводных аппаратов в технологии тотальной донной сейсморазведки / Технические проблемы освоения Мирового океана: тр. 4-й Всерос. науч.-техн. конф., Владивосток, 2011. Секция 2. С. 220–224.
 18. Пат. 2515170 РФ. Подвижная подводная автономная сейсмогидроакустическая станция разведки углеводородов на акватории арктического шельфа / П. Д. Груздев, В. П. Дмитриченко, Р. А. Жостков, В. Н. Кочедыков, М. З. Нисневич, О. В. Руденко, А. Л. Собисевич, Л. Е. Собисевич, В. А. Солдатенков, П. Д. Сухопаров (РФ). — № 2012136491/28; заявл. 24.08.2012; опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6. — 6 с.
 19. Кебкэл К. Г., Машошин А. И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. № 3. С. 115–130.
 20. Буя М. и др. Морская сейсморазведка по спиральной траектории Coil Shooting / М. Буя, П. Э. Флорес, Д. Хилл, Э. Палмер, Р. Росс, Р. Уокер, М. Хаубирс, М. Томпсон, С. Лаура, Д. Менликли, Н. Молдовану, Э. Снайдер // Нефтегазовое обозрение. 2008. Т. 21. № 4. С. 22–39.

UDC 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83

Concerted Action of a Radiator and Autonomous Uninhabited Submersibles for Effective Seismic ExplorationMartynova L. A.^a, Dr. Sc., Tech., Senior Researcher, martynowa999@bk.ru^aState Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: In seismic exploration, they traditionally use stationary geophones attached to a bottom, which is costly and inefficient. Placement of geophones on autonomous uninhabited submersibles allows you to partially automate the seismic exploration, giving up the static scheme of using the geophones for listening to the reflected signals created by a radiator, and switching to a dynamic scheme when a group of autonomous uninhabited submersibles gradually move together with a radiator. In this case, most geophones are busy accepting the reflected signal, and the rest of them are moving together with the submersibles to a new place. This significantly reduces the seismic exploration time. The problem is that the group of the submersibles should act in agreement with the radiator movement. **Purpose:** We have to develop a method of concerted action for a group of autonomous uninhabited submersibles and a radiator during seismic exploration. **Results:** A method has been developed to coordinate the movement of a radiator and the progress of a group of autonomous uninhabited submersibles when the radiator, moving along a shifting circular trajectory, constantly describes a circle around the position of the moving group of the submersibles. The values of the optimal parameters of their concerted movement were found on the basis of a specially formulated mathematical model. These values allow you to provide the broadest range of azimuths for the directions of the receipt of the reflected signals emitted by the radiator. **Practical relevance:** The dynamic scheme of using the geophones leads to an essentially shorter time necessary for seismic exploration in a given area as compared to the static scheme. Besides, the mobility of the entire system formed by a group of the submersibles and a radiator considerably increases, giving you many more ways to rapidly change the parameters of the concerted movement depending on a particular situation during the seismic exploration.

Keywords — Autonomous Uninhabited Submersible, Concerted Action, Azimuths, Mean Square Deviation.

References

1. Fashkhtudinov R. V. Reefs of Naval Seismic Exploration. *www.Korabel.ru*, 2016, iss. 2, pp. 98–106 (In Russian).
2. Laverov N. P., Dmitriyevsky A. N., Bogoyavlensky V. I. Fundamental Aspects of Development of Oil and Gas Resources of the Arctic Shelf of Russia. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2011, no. 1, pp. 25–37 (In Russian).
3. Laverov N. P., Lobkovsky L. I., Tulupov A. V., Ravens M. A., Ganzha O. Y. The Prospects of Ground Seismic Exploration in the Russian Federation. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2011, no. 4, pp. 4–13 (In Russian).
4. Kovachev S. A., Krylov A. A., Ivanov V. N., Timashkevich G. K., Kovacheva T. A., Hortov A. V. Seismichnost Near the Kravtsovsky Sea Oil and Gas Field in the Baltic Sea. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 4, pp. 34–40 (In Russian).
5. Krylov A. A. Some Aspects of Ground Seismological Researches and Monitoring on Objects of Oil and Gas Production and Transportation on the Shelf. *Zashchita okruzhaiushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2015, no. 9, pp. 20–25 (In Russian).
6. Krylov A. A., Ivashchenko A. I., Kovachev S. A. Assessment of Seismic Danger of Oil-and-Gas Shelf Zones on the Example of the Northern Caspian Sea. *Okeanologiya*, 2015, vol. 55, no. 6, pp. 1006–1012 (In Russian).
7. Krylov A. A. Modeling of Reaction of Porous Water-saturated Upper Rainfall of the Sea Shelf to Seismic Impacts. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 10, pp. 221–223 (In Russian).
8. Levchenko D. G. Methods and Means of Measuring the Parameters of Oceanic Environment by Automatic Multi-Purpose Bottom Stations. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2010, vol. 5, no. 2. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/12/28_2010.pdf (accessed 17 January 2017) (In Russian).
9. Delaney J. R. NEPTUNE: an Interactive Submarine Observatory at the Scale of a Tectonic Plate. Long-Term Observations in the Oceans. *OHP/ION Joint Symp.*, Japan, 2001, pp. 309.
10. Maultzsch S., Nawab R., Yuh S. An Integrated Multiazimuth VSP Study for Fracture Characterization in the Vicinity of a Well. *Geophys Prosp*, 2009, vol. 57, pp. 263–274.
11. Wild P. Practical Application of Seismic Anisotropy. *First Break*, May 2011, vol. 29, pp. 117–124.
12. Laverov N. P. The Prospects of Ground Seismic Exploration in the Russian Federation. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2011, no. 4, pp. 4–13 (In Russian).
13. Leurrera K. C. Compressional and Shear-wave Velocities and Attenuation in Deep-sea Sediment During Laboratory Compaction. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 2004, vol. 116, no. 4, pp. 2023–2030.
14. Mashoshin A. I., Zhumenkov S. V., Zinnatov V. B., Ermakov S. Y., Smirnov A. S. *Morskaya avtonomnaya donnaya stantsiya dlia vypolneniia geofizicheskikh i geologorazvedochnykh rabot* [The Sea Autonomous Ground Station for Accomplishment of Geophysical and Exploration Works]. Patent RU, no. 2381530, 2008.
15. Il'in I. A., Brodskij P. G., Anosov V. S., Levchenko D. G., Pavljukova E. R., Len'kov V. P., Chernjavets V. V., Zajtsev A. A., Gvozdet'skij A. L. *Avtonomnaya donnaya stantsiya dlia seismicheskikh nabludeniï* [Independent Bottom Station For Seismic Observations]. Patent RU, no. 2438149, 2010.
16. Sukonkin S. J., Rybakov N. P., Belov S. V., Chervinchuk S. J., Koshurnikov A. V., Pushkarev P. J., Chernjavets V. V. *Podvodnaya geofizicheskaia stantsiya* [Underwater Geophysical Station]. Patent RU, no. 2435180, 2010.
17. Maximov S. V. About use of Autonomous Uninhabited Submersibles in Technology of Total Ground Seismic Exploration. *Trudy 4-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Tekhnicheskie problemy osvoeniia Mirovogo okeana"* [Proc. 4th All-Russian Scientific and Technical Conference "Engineering Problems of Development of the World Ocean"], 2011, Section 2, Vladivostok, pp. 220–224 (In Russian).
18. Gruzdev P. D., Dmitrichenko V. P., Zhostkov R. A., Kochedykov V. N., Nisnevich M. Z., Rudenko O. V., Sobisevich A. L., Sobisevich L. E., Soldatenkov V. A., Sukhoparov P. D. *Podvizhnaia podvodnaia avtonomnaia seismogidrokusticheskaya stantsiya razvedki uglevodorodov na akvatorii arkticheskogo shel'fa* [Mobile Self-contained Underwater Seismic-hydroacoustic Station for Exploration of Hydrocarbons on Water Area of Arctic Shelf]. Patent RU, no. 2515170, 2012.
19. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. Acoustic Positioning Methods of Autonomous Underwater Vehicles. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2016, vol. 24, no. 3, pp. 115–130 (In Russian).
20. Flores P. E., Hill D., Palmer E., Ross R., Walker R., Haurbirs M., Thompson M., Laura S., Menlikli D., Moldovan N., Snider E. Naval Seismic Exploration on a Spiral Trajectory of Coil Shooting. *Neftegazovoe obozrenie*, 2008, vol. 21, no. 4, pp. 22–39 (In Russian).