

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕДЕНИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

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

Введение: наиболее перспективным видом поиска в ледовой обстановке является сейсморазведка, заключающаяся в размещении на морском дне геофонов, принимающих отраженные от залежей углеводородов сигналы, излучаемые специальным вибратором. Переход от статической схемы ведения сейсморазведки к динамической с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов, несмотря на свою привлекательность, является сложной в реализации задачей с точки зрения обеспечения согласованного поведения излучателя, совершающего круговые движения, и поступательно перемещающейся группы автономных необитаемых подводных аппаратов. Широкомасштабное проведение исследований по определению оптимальных параметров динамической системы ведения сейсморазведки возможно только с использованием математического моделирования, позволяющего создать инструментарий (совокупность методических и технических средств) для исследований эффективности ведения сейсморазведки. **Цель исследования:** на основе математической модели разработать инструментарий для исследования эффективности ведения сейсморазведки с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов. **Результаты:** в качестве показателей эффективности приняты: время обследования заданного района, степень координации работы излучателя и группы автономных необитаемых подводных аппаратов, степень широкоазимутальности направлений прихода отраженных сигналов, создаваемых излучателем. Сформулированы требования к математической модели, связанные со степенью детализации воспроизводимых процессов. На базе математической модели разработан инструментарий для проведения исследований, включающий в себя: таблицы значений азимутов прихода отраженных сигналов и расстояний от автономных необитаемых подводных аппаратов до излучателя в каждом такте имитации, гистограммы распределения азимутов отраженных сигналов и дистанций до излучателя, траектории относительного перемещения автономных необитаемых подводных аппаратов вокруг излучателя, розу-диаграмму азимутов, таблицу накопленных значений азимутов и дистанций, графическое представление изменения среднеквадратического отклонения азимутов с течением времени. На конкретном примере продемонстрирована возможность использования разработанного инструментария для оптимизации параметров ведения сейсморазведки. **Практическая значимость:** применение разработанных показателей и инструментария приводит к существенному сокращению времени на проведение исследований по выбору оптимальных алгоритмов поиска, а также способствует наглядности получения значений, вскрытию причинно-следственных связей, а значит — оперативному принятию решения по выбору оптимальных параметров и технических решений.

Ключевые слова — автономный необитаемый подводный аппарат, математическое моделирование, метод согласованного поведения, азимуты, среднеквадратическое отклонение.

Введение

Поиску месторождений углеводородов в настоящее время уделяется повышенное внимание, особенно в Арктических районах [1–10]. Наиболее перспективным видом поиска в ледовой обстановке является сейсморазведка [11–17], заключающаяся в размещении на морском дне геофонов, принимающих отраженные от залежей углеводородов сигналы, излучаемые специальным вибратором (далее — излучателем). Использование геофонов в составе автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), способных оперативно перемещаться как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях, открывает широкие возможности для дальнейшего совершенствования сейсморазведки с использованием АНПА путем формирования динамической системы, поступательно перемещающейся в пространстве за счет того, что большая часть АНПА задействована для приема сигналов, а меньшая часть осуществляет перемещение в новое место своей дислокации [18]. Однако динами-

ческая схема ведения сейсморазведки, несмотря на свою привлекательность, является сложной в реализации с точки зрения обеспечения согласованного поведения излучателя, совершающего круговые движения, и поступательно перемещающейся группы АНПА.

Сказанное означает, что необходим тщательный подход к выбору параметров согласованного движения излучателя и группы АНПА. Для определения оптимальных параметров сейсморазведки необходимо проведение исследований, основанных на оценке эффективности сейсморазведки.

Исследования путем натурального эксперимента для определения этих параметров экономически не оправданы, так как:

— требуют существенных трудозатрат на оснащение полигона, использования вспомогательной техники и т. д.;

— результаты натурального эксперимента существенно зависят от условий его проведения, и при других условиях ведения сейсморазведки принятые значения параметров могут привести к результатам, далеким от оптимальных.

Поэтому для определения оптимальных параметров динамической системы при проведении сейсморазведки целесообразно использовать математическое моделирование, позволяющее создать инструментарий для исследований эффективности ведения сейсморазведки. Под инструментарием будем понимать совокупность методических и технических средств проведения исследований.

Целью настоящей работы явилась разработка на основе математической модели инструментария для исследований эффективности ведения сейсморазведки, обеспечивающего возможность определения оптимальных параметров ведения сейсморазведки с использованием группы АНПА.

Показатели эффективности ведения сейсморазведки

Определение оптимальных параметров осуществляется на основании оценки эффективности ведения сейсморазведки. В качестве показателей эффективности были выбраны параметры, характеризующие степень достижения поставленной в сейсморазведке цели. Поскольку целью сейсморазведки является обнаружение залежей углеводородов и определение их местоположения, то при разработке инструментария для оценки эффективности ведения сейсморазведки использованы следующие показатели эффективности:

- время ведения обследования заданного района;
- степень координировании работы излучателя и группы АНПА;
- степень широкоазимутальности, выраженная отклонением от равномерного распределения азимутов, полученных в ходе численного эксперимента.

Первый показатель эффективности — это время, затрачиваемое на ведение сейсморазведки. Время обследования определяется скоростью согласованного перемещения излучателя и группы АНПА.

Инструментарий предоставляет возможность для рассмотрения различных схем ведения сейсморазведки, например, таких двух схем согласованного поведения излучателя и группы АНПА:

— *схемы 1*, при которой происходит чередование перемещения группы АНПА и прием отраженного сигнала. Во время перемещения группы АНПА излучатель либо ждет, пока АНПА группы займут новые позиции, либо продолжает движение по круговой траектории, но без обеспечения группой АНПА приема отраженных сигналов. При этом переход к режиму ожидания связан с выполнением дополнительных технологических мероприятий по торможению, остановке, разгону излучателя, что менее выгодно, чем

установившееся движение, поскольку установившееся движения всегда более экономично;

— *схемы 2*, при которой система «излучатель — группа АНПА» постоянно перемещается в соответствии с технологическими возможностями АНПА.

Время, затрачиваемое на выполнение технологических операций, сопровождающих проведение сейсморазведки, расходуется на:

- прикрепление АНПА к донной поверхности (t_1);
- позиционирование АНПА (t_2);
- прослушивание отраженных сигналов, создаваемых излучателем (t_3);
- всплытие АНПА на заданную глубину для перемещения в следующую позицию (t_4);
- перемещение АНПА в заданную точку (t_5).

Время $t_{и}$ движения излучателя по окружности радиуса $R_{и}$ определяется выражением

$$t_{и} = \frac{2\pi R_{и}}{V_{и}},$$

где $V_{и}$ — скорость движения излучателя.

С точки зрения широкоазимутальности целесообразно описать по крайней мере один круг вокруг группы АНПА.

Тогда радиус $R_{и}$ определяется топологией взаимного положения группы АНПА и окружности исходя из того, что окружность должна быть описана вокруг группы АНПА для повышения широкоазимутальности, и длительностью одного оборота АНПА вокруг группы.

За время t_3 будет осмотрена площадь $R_{и}^2$ при движении излучателя со скоростью

$$V_{и} = \frac{2\pi R_{и}}{t_3}.$$

Затем происходит технологический перерыв по перемещению группы АНПА на новое место дислокации. На это затрачивается время

$$T_{тех} = t_1 + t_2 + t_4 + t_5.$$

В это время зондирование дна излучателем не производится; излучатель при этом может как находиться в состоянии покоя, так и продолжать свое движение.

Таким образом, время, затраченное на осмотр района площадью R^2 , определяется соотношением

$$T_{осм} = t_3 + (t_1 + t_2 + t_4 + t_5).$$

При *схеме 2* технологическое время $T_{тех}$, необходимое на приход АНПА в требуемую позицию для приема отраженных сигналов, «содержится» во времени t_3 , затрачиваемом на движение излу-

чателю по круговой траектории, поскольку перемещение части АНПА из группы, технологические работы по размещению их на дне и подготовка к приему отраженного сигнала происходят синхронно с перемещением излучателя. В этом случае времени на обследование района той же площади, что и в схеме 1, потребуется на $T = t_1 + t_2 + t_4 + t_5$ меньше, что позволяет считать схему 2 более эффективной по сравнению со схемой 1.

Второй показатель эффективности — степень координирования работы излучателя и группы АНПА — заключается в максимально возможном согласованном движении группы АНПА и центра окружности, вдоль которой осуществляется движение излучателя. Очевидно, что идеальным является вариант абсолютного совпадения геометрического «центра масс» группы АНПА с положением центра окружности, поэтому показатель эффективности определяется расстоянием между центром группы АНПА и центром окружности, оцениваемым в каждый момент времени ведения сейсморазведки.

Третий показатель эффективности — степень широкоазимутальности. Параметром, характеризующим степень широкоазимутальности, является среднеквадратическое отклонение (СКО) азимутов — отклонение от среднего значения азимутов прихода отраженных от залежей углеводородов сигналов на каждый геофон в каждый момент времени ведения сейсморазведки. Степень широкоазимутальности характеризуется СКО азимутов. При этом необходимо оговориться, что это происходит при полной группе азимутов или по крайней мере при получении не менее, например, 80 % отраженных сигналов. Если вследствие ограничений по дальности приема отраженных сигналов их количество окажется меньше, то погрешность разностно-дальномерного метода для определения местоположения залежей углеводородов может увеличиться.

Инструментарий для оценки эффективности ведения сейсморазведки

В основу разработанного инструментария для оценки эффективности положена математическая модель, в которой осуществляется воспроизведение поведения излучателя; группы АНПА; отдельно взятого АНПА, всецело определяемого поведением группы АНПА, как единого целого (АНПА в «контейнере»).

Степень детализации процессов, воспроизводимых в математической модели, определяется этапностью разработки математической модели. Разработанная в настоящей работе математическая модель воспроизводит процесс сейсморазведки в целом и может быть использована на начальных этапах исследований. На дальнейших

этапах проведения исследований, направленных на уточнение полученных на первом этапе результатов, ее необходимо будет дополнять и масштабировать за счет повышения степени детализации отдельных процессов с учетом сбалансированности всех воспроизводимых процессов, реализованных в математической модели.

В основу разработанного инструментария положены результаты имитации процессов, происходящих при ведении сейсморазведки. В каждом такте имитации воспроизводились процессы движения излучателя по круговой траектории, движение группы АНПА и отдельно взятых АНПА из группы, излучение излучателем зондирующего импульсного сигнала и прием геофонами отраженного от месторождений углеводородов сигнала. При этом оценивались задержки прихода сигнала на геофоны, и по полученным задержкам с использованием разностно-дальномерного метода определялись координаты положения залежей месторождений углеводородов. Месторождение углеводородов моделировалось в виде эллипсоида, размеры которого являлись случайными и разыгрывались равномерно из заданного диапазона. Положение месторождения в заданном районе также было случайным и разыгрывалось равномерно.

Для проведения численных экспериментов по определению оптимальных параметров ведения поиска месторождений углеводородов по предложенной схеме согласованного движения группы АНПА и излучателя разработанная математическая модель была программно реализована в виде программно-аппаратного комплекса.

Разработанный программно-аппаратный комплекс при проведении исследований, направленных на определение условий, обеспечивающих координацию функционирования излучателя и группы АНПА, дает возможность оперативно варьировать значения параметров, оказывающих влияние на координацию (согласованность). Такими параметрами являются:

- радиус окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя;
- скорость и направление перемещения центра этой окружности;
- скорость перемещения группы;
- геометрические размеры группы.

Программно-аппаратный комплекс представляет инструментарий, позволяющий иметь оперативную информацию о степени влияния параметров согласованного ведения сейсморазведки на широкоазимутальность и другие показатели эффективности.

Инструментарий программно-аппаратного комплекса обеспечивает:

- возможность оперативного ввода значений основных параметров поведения излучателя и группы АНПА при ведении сейсморазведки;

— отображение общего плана движения излучателя и группы АНПА в динамике;

— отображение результатов моделирования — конечного (СКО азимутов в цифровом виде) и промежуточных, оказывающих влияние на конечный результат.

Описание инструментария для проведения исследований

Для того чтобы иметь возможность наблюдать динамическое развитие процесса ведения сейсморазведки в реальном времени, в каждом такте имитации определяются текущие параметры — как промежуточные, так и конечные.

Среднеквадратическое отклонение азимутов в оцифрованном виде отображается на экране во время всего процесса имитации ведения сейсморазведки, что позволяет оперативно наблюдать количественный результат эффективности функционирования динамической системы ведения сейсморазведки.

Однако отображения одного только конечного результата — СКО азимутов — недостаточно для вскрытия причинно-следственных связей и факторов, оказывающих влияние на конечный результат, необходимо дополнительно иметь данные, оказывающие влияние на полученный результат. Поскольку СКО азимутов — это результат обобщения азимутов, то наряду со СКО азимутов необходимо иметь представление о распределении азимутов как в цифровом виде, так и в более наглядном — графическом представлении, например, в виде гистограммы. Поэтому наряду со значением СКО азимутов в программно-аппаратном комплексе реализована возможность отображения гистограммы распределения азимутов по направлениям прихода отраженных сигналов.

Отображение гистограммы азимутов позволяет проследить в динамике изменение распределения азимутов по направлениям с тем, чтобы иметь возможность оказать влияние на вид гистограммы путем корректировки задаваемых параметров сейсморазведки.

Вместе с тем отображение гистограммы распределения азимутов по направлениям не учитывает ограничения на дистанции приема отраженных сигналов, формируемых излучателем. Поэтому программно-аппаратный комплекс предоставляет в дополнение к описанному выше инструментарию в виде отображения:

— траекторий движения АНПА группы относительно излучателя;

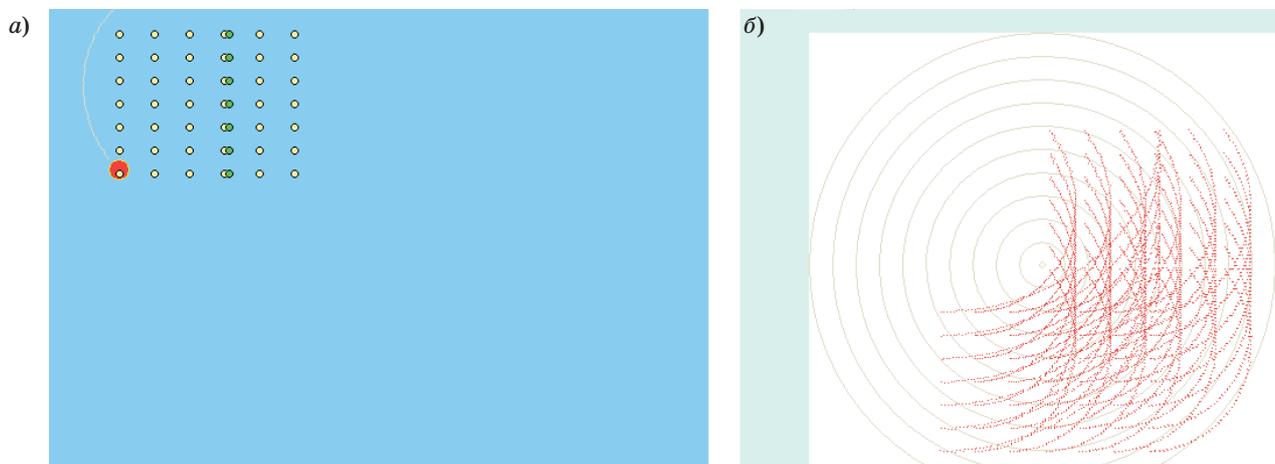
— розы-диаграммы, отражающей плотность заполнения сейсмотрасс цветовым решением по направлениям и по дистанциям.

Вид траекторий движения АНПА из группы относительно излучателя представлен на рис. 1, а, поступательное движение излучателя и группы АНПА показано на рис. 1, б.

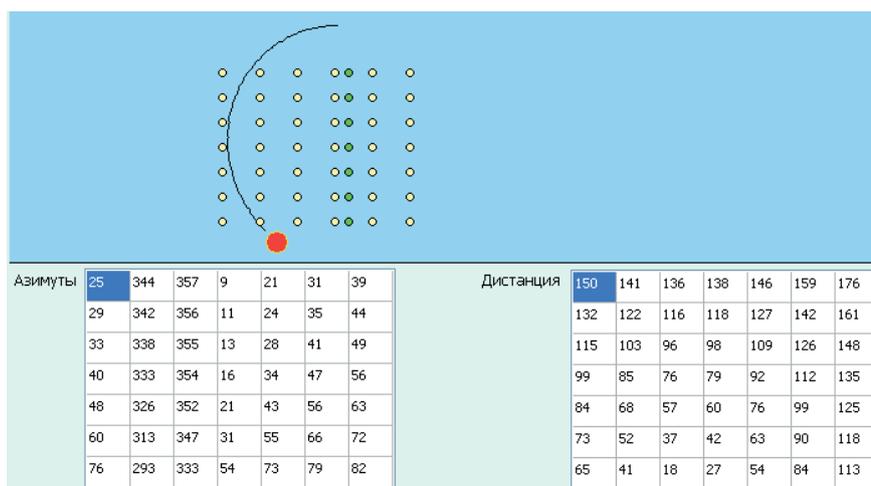
Для того чтобы иметь возможность определить, на основе каких данных сформированы траектории относительного движения и роза-диаграмма, в реальном времени в каждом такте имитации программно-аппаратный комплекс обеспечивает отображение текущих значений азимутов каждого АНПА и дистанций в цифровом виде, как это показано в таблицах на рис. 2.

На основании этих таблиц формируется сводная таблица азимутов и дистанций с результатами суммирования азимутов по направлениям и дистанций по отрезкам, позволяющая, по сути, иметь оцифрованный вид гистограмм (рис. 3).

И, наконец, программно-аппаратный комплекс обеспечивает отображение конечного результата, динамику его изменения с течением времени. Для этого в каждом такте имитации



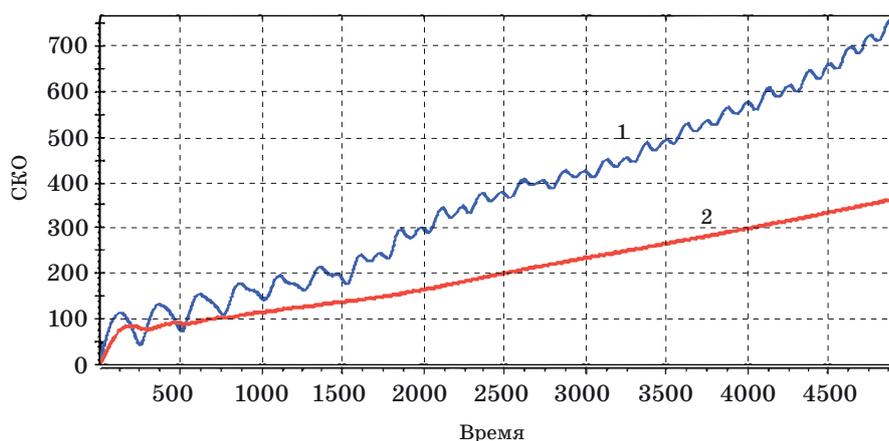
■ **Рис. 1.** Отображение согласованного перемещения излучателя и группы АНПА (а) и траекторий перемещения АНПА относительно излучателя (б)



■ Рис. 2. Отображение таблиц азимутов и дальностей в ходе согласованного перемещения излучателя и группы АНПА

0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400		
10	211	618	991	1151	1151	1105	593														5820	
20	225	721	869	1100	1194	1143	788															6040
30	288	628	1042	1152	1167	1040	864	331														6512
40	241	686	901	1011	998	1014	908	596	83													6438
50	294	680	847	948	1050	912	835	690	301													6557
60	283	660	958	871	1097	1014	874	716	412													6885
70	249	749	781	1168	893	1164	998	778	480													7260
80	251	825	771	999	1092	1228	1214	852	438													7670
90	191	718	816	1109	1178	1156	1398	1139	203													7908
100	210	809	947	1285	1387	1328	1357	1148	226													8697
110	232	837	779	1022	1067	1212	1206	829	435													7619
120	255	720	784	1155	883	1171	948	742	497													7155
130	244	662	939	876	1058	993	881	720	414													6787
140	289	652	825	916	1086	906	871	701	281													6527
150	269	662	930	945	994	1087	940	557	52													6436
160	270	626	1004	1151	1120	1082	857	263														6373
170	233	719	871	1058	1242	1087	734															5944
180	335	668	921	1108	1131	1010	538															5711
190	179	676	1009	1167	1215	1097	525															5868
200	283	746	928	1076	1211	1060	745															6049
210	301	641	939	1062	1095	1049	857	317														6261
220	276	674	831	973	949	1044	866	562	78													6253
230	273	653	843	920	1009	870	866	646	292													6372
240	280	604	888	767	1071	977	807	735	403													6532
250	255	733	777	1125	849	1064	982	701	485													6971
260	251	784	767	894	1088	1088	1224	785	428													7309
270	207	660	783	1019	1137	1112	1334	1101	132													7485
280	239	719	979	1202	1354	1253	1347	1107	182													8382
290	285	795	690	950	1100	1127	1193	762	416													7318
300	297	713	827	1127	839	1109	951	713	478													7054
310	266	625	917	811	1071	998	825	707	370													6590
320	275	633	832	925	1020	894	814	668	276													6337
330	272	688	865	1008	991	980	909	584	60													6357
340	250	654	994	1060	1144	1075	839	275														6291
350	290	783	929	1050	1147	1070	761															6030
360	177	585	921	1131	1093	994	517															5418
9226	25006	31695	37292	39171	38513	33166	19725	7422	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

■ Рис. 3. Таблица накопленных значений азимутов и дистанций дальностей в ходе согласованного перемещения излучателя и группы АНПА



■ **Рис. 4.** Вид изменения СКО азимуты направлений прихода отраженных сигналов в течение согласованного перемещения излучателя и группы АНПА: 1 — накопленный; 2 — осредненный по тактам

строится график СКО накопленных значений азимуты к текущему моменту времени, а также интегрированное СКО азимуты на текущий момент времени (рис. 4).

Предложенный инструментарий, предоставляемый программно-аппаратным комплексом, позволяет проводить всесторонний анализ влияния параметров на конечный результат, оптимизировать параметры сейсморазведки для обеспечения эффективного ее ведения.

Далее приведено описание использования инструментария программно-аппаратного комплекса при проведении исследований, направленных на вскрытие причинно-следственных связей при ведении сейсморазведки.

Пример использования предлагаемого инструментария для проведения исследований

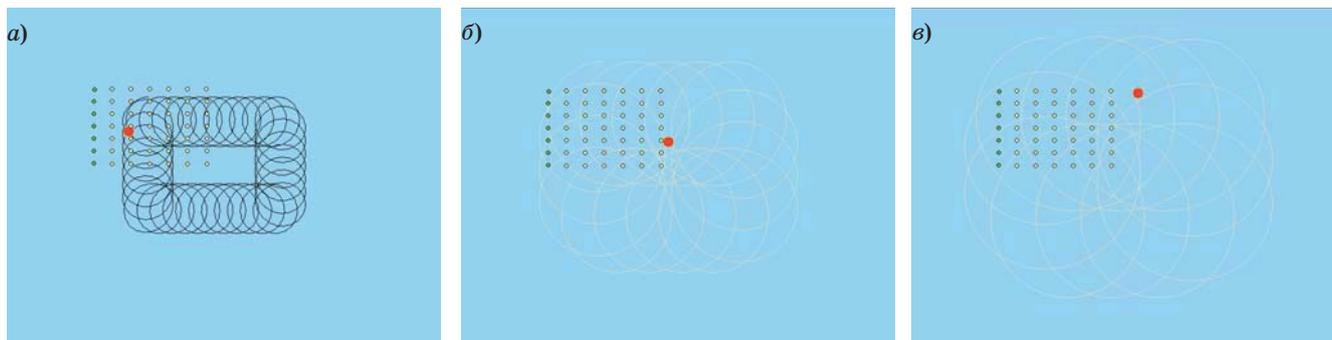
Был проведен эксперимент для различных значений радиуса движения излучателя по окружности (рис. 5, а–в). При этом была задана дальность приема отраженного сигнала, равная 180 м.

По результатам проведения численного эксперимента была получена зависимость значений СКО азимуты от радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя (рис. 6).

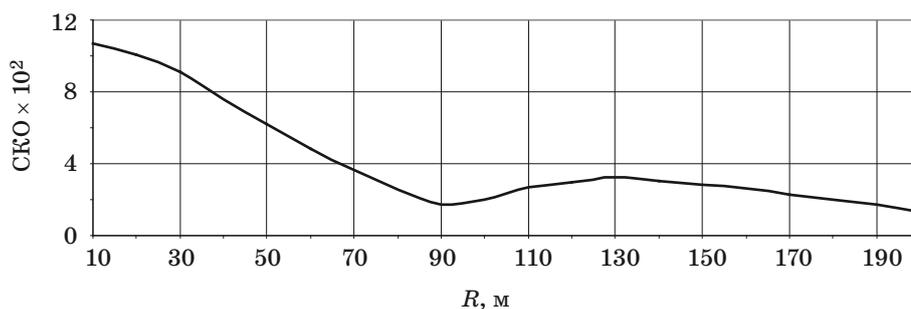
Для примера проанализируем результат, полученный при изменении радиуса обхода группы от 10 до 200 м, и оценим влияние радиуса на СКО азимуты.

Ярко выраженный минимум СКО азимуты виден при $R = 90$ м. Для определения причин изменения монотонности зависимости СКО азимуты от радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, используем предоставляемый программно-аппаратным комплексом инструментарий. Анализ результатов производился в два этапа.

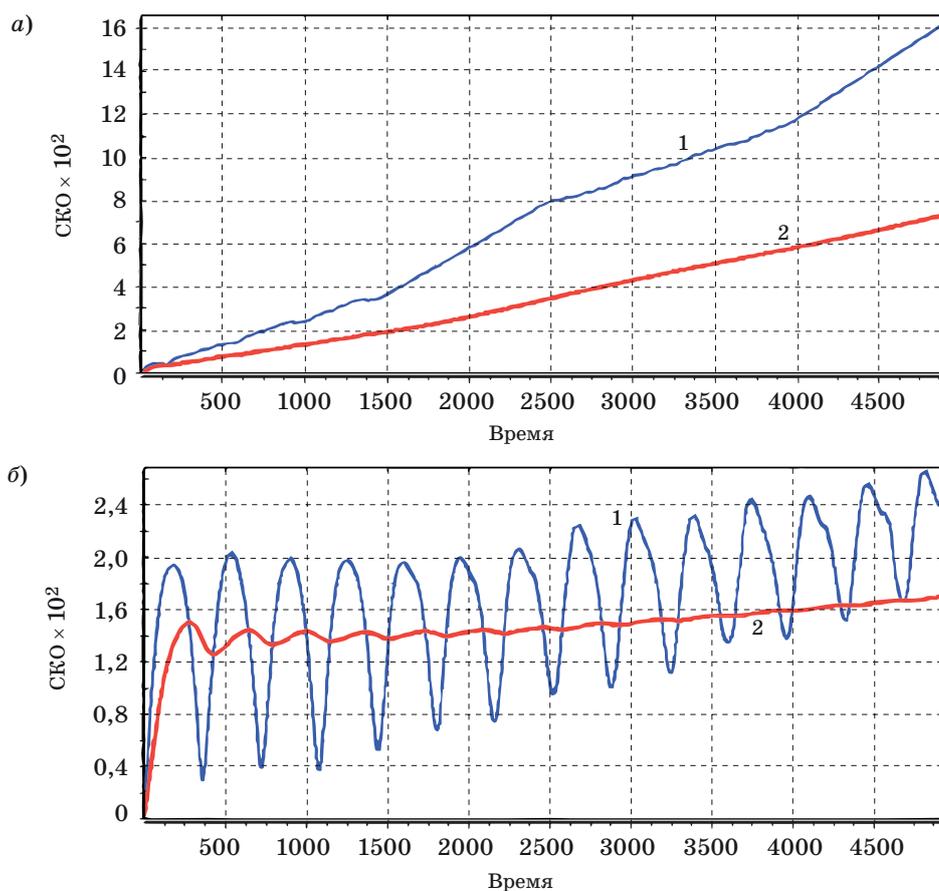
На первом этапе анализируем причину наличия максимума СКО азимуты при $R = 10$ м, а затем последующее снижение СКО азимуты вплоть до значения $R = 100$ м. Зависимости СКО азимуты накопленного сигнала 1 и осредненного по тактам 2 для двух вариантов показаны на рис. 7, а и б.



■ **Рис. 5.** Схема согласованного перемещения излучателя и группы АНПА при различных радиусах окружности, вдоль которой происходит движение излучателя: а — 40 м; б — 100 м; в — 140 м



■ Рис. 6. Влияние радиуса окружности на СКО азимутов



■ Рис. 7. Зависимости СКО азимутов от радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя: а — $R = 10$ м; б — $R = 100$ м

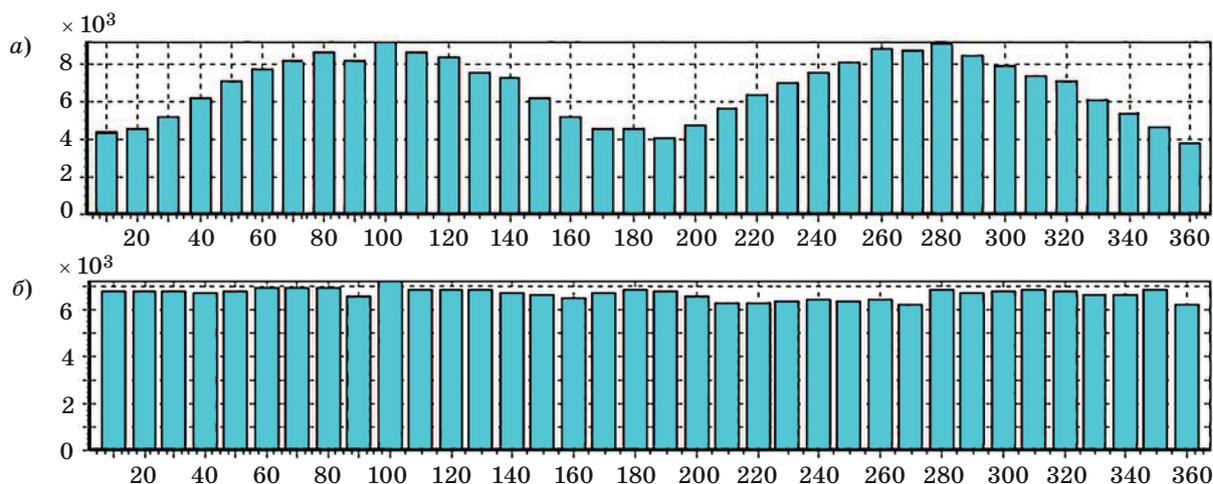
Для выявления степени равномерности азимутов направлений, с которых приходит отраженный сигнал, проанализируем гистограммы, представленные на рис. 8.

При $R = 10$ м (рис. 8, а) значения азимутов в каждом такте, по сути, одни и те же, поскольку излучатель вращается по круговой траектории внутри группы.

Сравнивая гистограммы, видим, что при $R = 10$ м в гистограмме азимутов с течением времени формируются ярко выраженные максимумы в области 100 и 270° , а при $R = 100$ м (соответствует точке

минимума на графике рис. 6) имеем распределение, близкое к равномерному (рис. 8, б).

Минимум в гистограмме азимутов возникает из-за периодичности зависимости, которая хорошо видна на графике: за счет колебаний происходит компенсация однобоких направлений прихода отраженного сигнала. В свою очередь, периодичность возникает из-за постепенного описания излучателем окружности вокруг группы АНПА. Для понимания того, откуда берется периодичность, смотрим на цифровые значения в таблице (см. рис. 3).



■ **Рис. 8.** Гистограммы распределения азимутов направлений, с которых приходит отраженный сигнал: *а* — $R = 10$ м; *б* — $R = 100$ м

Физически все описанное выше означает следующее: при движении излучателя внутри группы с малым радиусом вне зависимости от его положения все геофоны будут наблюдаться под одними и теми же «внутренними» углами. Чтобы скомпенсировать внутренние углы, необходимо хотя бы часть азимутов иметь при нахождении излучателя за пределами группы.

На втором этапе проведения исследований анализируем причину начала подъема значений СКО азимутов после точки $R = 100$ м (см. рис. 6).

Анализ таблиц цифровых значений показал, что с ростом радиуса окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, возникает тот же эффект, что и при малом радиусе: с увеличением радиуса вне зависимости от положения излучателя на окружности все направления прихода отраженного сигнала на АНПА группы являются «внешними». Этим объясняется увеличение СКО азимутов с увеличением радиуса. Увеличение СКО азимутов продолжается до отметки $R = 130$ м, однако затем снова начинается спад. Для анализа причин этого явления рассмо-

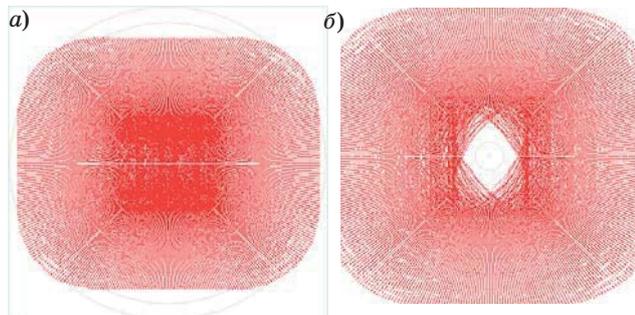
трим траектории (рис. 9, *а* и *б*) и розу-диаграмму (рис. 10, *а* и *б*) при $R = 100$ м и $R = 180$ м.

Наблюдается влияние ограничения по дальности приема отраженного сигнала: на рис. 9, *б* трассы явно вышли за пределы заданных дальностей. Об этом же свидетельствует роза-диаграмма азимутов (см. рис. 10): при увеличении радиуса окружности часть дистанций вышла за пределы заданной предельно допустимой дальности.

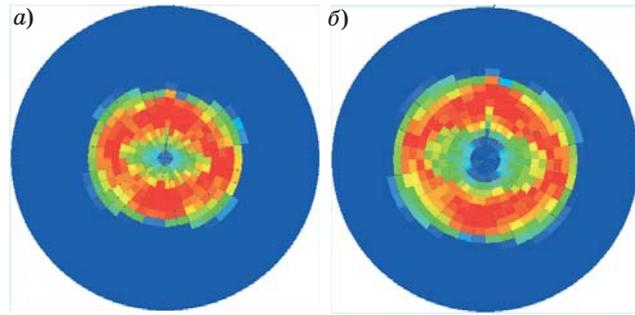
Для того чтобы определить часть азимутов, которые были исключены из расчета СКО азимутов, рассмотрим гистограммы распределения дистанций (рис. 11, *а* и *б*). Видно, что большая часть дистанций вышла за допустимые пределы.

Этим объясняется спад СКО азимутов на графике (см. рис. 6): из статистического накопления для определения СКО азимутов были исключены часть азимутов вследствие выхода дистанций прихода отраженных сигналов за допустимые пределы.

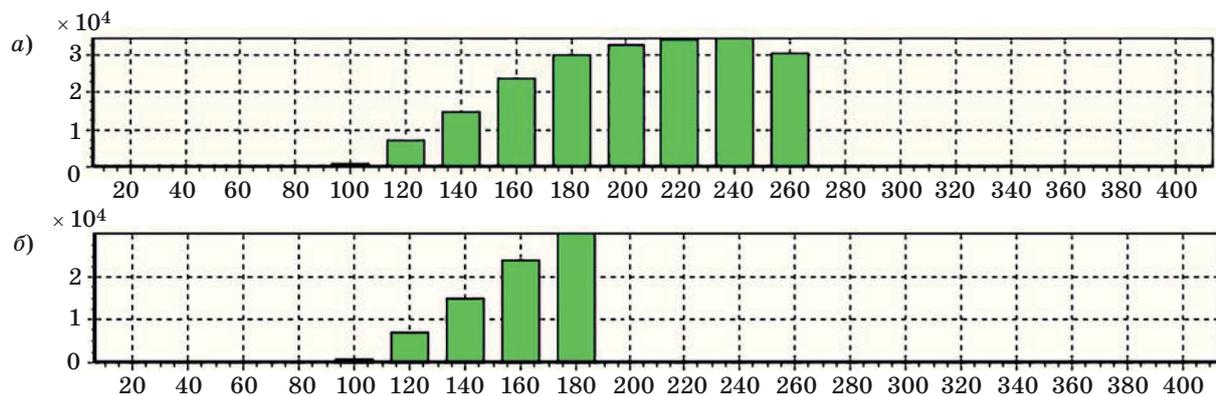
Однако снижение СКО азимутов на больших радиусах вследствие исключения части азимутов из статистической обработки нельзя считать в данном случае положительным результатом, по-



■ **Рис. 9.** Траектория перемещения АНПА относительно излучателя: *а* — $R = 100$ м; *б* — $R = 180$ м



■ **Рис. 10.** Роза-диаграмма плотности сейсмотрасс по азимутам и дистанциям: *а* — $R = 100$ м; *б* — $R = 180$ м



■ **Рис. 11.** Гистограмма распределения дистанций без ограничений (а) и с ограничениями (б) по дальности

скольку при исключении части азимутов уменьшается общее число АНПА, участвующих при использовании разностно-дальномерного метода расчета местоположений залежей углеводородов, в связи с чем возникают погрешности определения местоположения залежей углеводородов, только теперь уже на уровне самого метода.

Заключение

Определены показатели эффективности ведения сейсморазведки с использованием группы АНПА.

Разработан инструментарий для определения параметров согласованного поведения излучателя и группы АНПА с приемниками-геофонами.

Положенная в основу разработанного инструментария математическая модель с элементами имитации может рассматриваться как базовая при формировании общей схемы ведения сейсморазведки и в дальнейшем может быть расширена за счет повышения степени детализации отдельных воспроизводимых в ней процессов.

Программная реализация математической модели предоставляет инструментарий, который позволяет проводить широкомасштабные исследования влияния параметров ведения сейсморазведки на результат согласованного функционирования излучателя и группы АНПА, вскрывать причинно-следственные связи и намечать пути повышения эффективности ведения сейсморазведки, определять параметры оптимальной схемы функционирования излучателя и группы АНПА для обеспечения эффективного ведения сейсморазведки залежей углеводородов.

Анализ результатов в реальном масштабе времени позволяет оперативно внести коррективы в схему ведения сейсморазведки, выявить причины снижения результатов, создать основу для проведения дальнейших, более глубоких исследований в рамках выбранной схемы ведения сейсморазведки залежей углеводородов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00666).

Литература

1. Фасхутдинов Р. В. Подводные камни морской сейсморазведки // www.Korabel.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., Лобковский Л. И., Тулупов А. В., Воронов М. А., Ганжа О. Ю. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // *Арктика: экология и экономика*. 2011. № 4. С. 4–13.
4. Зверев С. М. ГСЗ на океанах за 30 лет экспедиций: методика и волновые поля // *Физика Земли*. 1999. № 7–8. С. 143–163. <http://www.arctica-ac.ru/docs/4/4-13.pdf> (дата обращения: 03.02.2017).
5. Тюхалов В. И. Исследование и разработка автоматизированной системы управления и контроля параметров группового пневматического источника для морской нефтегазовой сейсморазведки. <http://earthpapers.net/issledovanie-i-razrabotka-avtomatizirovannoy-sistemy-upravleniya-i-kontrolya-parametrov-grupпового-pnevmaticheskogo-istoc> (дата обращения: 03.02.2017).
6. Лисицын Е. Д., Кяспер В. Э., Петров А. А., Тулупов А. В. Новые возможности морских электромагнитных исследований при поисках углеводородов в транзитной зоне, на мелководье и на больших глубинах. <http://rudocs.exdat.com/docs/index-16267.html?page=4> (дата обращения: 03.02.2017).
7. 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. P. 309.

8. 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.
9. Wild P. Practical Application of Seismic Anisotropy // *First Break.* May 2011. Vol. 29. P. 117–124.
10. Leureira 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.
11. Пат. 2381530 РФ. Морская автономная донная станция для выполнения геофизических и геологических 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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. Секция 2. Владивосток, 2011. С. 220–224.
15. 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.
16. Кебкэл К. Г., Машошин А. И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // *Гирроскопия и навигация.* 2016. Т. 24. № 3. С. 115–130.
17. Буя М., Флорес П. Э., Хилл Д., Палмер Э., Росс Р., Уокер Р., Хаубирс М., Томпсон М., Лаура С., Менликли Д., Молдовану Н., Снайдер Э. Морская сейсморазведка по спиральной траектории Coil Shooting // *Нефтегазовое обозрение.* 2008. Т. 21. № 4. С. 22–39.
18. Мартынова Л. А. Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // *Информационно-управляющие системы.* 2017. № 1. С. 83–92. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83

UDC 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.77

Tools for Studying the Efficiency of Seismic Exploration with Standalone Unmanned SubmersiblesMartynova L. A.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, martynowa999@bk.ru^aState Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Seismic survey is the most promising type of underice exploration. Seabed geophones accept the signals radiated by a special vibrator and then reflected from hydrocarbon deposits. The transition from a static seismic exploration scheme to a dynamic one with the use of standalone unmanned submersibles is tempting but difficult to implement, as it is hard to ensure the concordant action of a radiator moving in circles and a group of submersibles moving progressively. A large-scale research to determine the optimal parameters for a dynamic seismic survey system is possible only with the use of mathematical modeling allowing you to create tools (a set of methodical and technical means) for the researches of seismic exploration efficiency. **Purpose:** The goal is to offer a mathematical model for developing the tools of studying the efficiency of seismic exploration with the use of standalone unmanned submersibles. **Results:** For the role of performance indicators, we have accepted the specified area inspection time, the degree of coordination between the radiator and the group of submersibles, and the width of the azimuth formed by the directions of the received signals emitted by the radiator. We have formulated the requirements to the mathematical model associated with the degree of specification of the modelled processes. On the base of the mathematical model, the research tools have been developed which include the tables of azimuth values for the reflected signals and distances from the submersibles to the radiator on each step of the simulation, the distribution histograms for the azimuths of the reflected signals and distances to the radiator, the relative movement trajectories for the submersibles, an azimuthal rose diagram, a table of cumulative values for azimuths and distances, and a graphical representation of the mean squared deviation of the azimuths in time. A special example demonstrates the way of using the developed tools to optimize the parameters of seismic exploration. **Practical relevance:** The developed indicators and tools can essentially reduce the time necessary for choosing the optimal search algorithms. It also helps you to visualize obtaining the values, to reveal the cause and effect and, hence, to provide a quick decision-making in choosing the optimal parameters and technical solutions.

Keywords — Standalone Unmanned Submersible, Concordant Action Method, Azimuths, Mean Squared Deviation.

References

1. Fashkutdinov 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. L., 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. Zverev S. M. GSZ in Oceans in 30 Years of Expeditions: Technique and Wave Fields. *Physics of Earth*, 1999, no. 7–8, pp. 143–163. Available at: <http://www.arctica-ac.ru/docs/4/4-13.pdf> (accessed 03 February 2017) (In Russian).
5. Tyukhalov V. I. *Issledovanie i razrabotka avtomatizirovanoi sistemy upravleniya i kontrolya parametrov gruppovogo pnevmaticheskogo istochnika dlia morskoi neftegazovoi seismorazvedki* [Research and Development of an Automated Control System and Control of Parameters Group Pneumatic a Source for Naval Oil and Gas Seismic Exploration]. Available at: <http://earthpapers.net/issledovanie-i-razrabotka-avtomatizirovannoy-sistemy-upravleniya-i-kontrolya-parametrov-gruppovogo-pnevmaticheskogo-istoc> (accessed 03 February 2017) (In Russian).
6. Lisitsyn E. D., Kyasper V. E., Petrov A. A., Tulupov A. V. *Novye vozmozhnosti morskikh elektromagnitnykh issledovaniy pri poiskakh uglevodorodov v tranzitnoi zone, na melkovode i na bol'shikh glubinakh* [New Opportunities of Sea Electromagnetic Researches by Searches of Hydrocarbons in a Transit Zone, in Shallow Water and at Big Depths]. Available at: <http://rudocs.exdat.com/docs/index-16267.html?page=4> (accessed 03 February 2017) (In Russian).
7. Delaney J. R. NEPTUNE: an Interactive Submarine Observatory at the Scale of a Tectonic Plate. *OHP/ION Joint Symp.*, Japan, 2001, p. 309.
8. 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.
9. Wild P. Practical Application of Seismic Anisotropy. *First Break*, May 2011, vol. 29, pp. 117–124.
10. Leurera 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.
11. Mashoshin A. I., Zhumenkov S. V., Zinnatov V. B., Ermakov S. Y., Smirnov A. S. *Morskaia avtonomnaia donnaia stantsiia dlia vypolneniya geofizicheskikh i geologorazvednykh robot* [The Sea Autonomous Ground Station for Accomplishment of Geophysical and Exploration Works]. Patent RU, no. 2381530, 2008 (In Russian).
12. 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. *Avtonomnaia donnaia stantsiia dlia seismicheskikh nabliudenii* [Independent Bottom Station for Seismic Observations]. Patent RU, no. 2438149, 2010.
13. Sukonkin S. J., Rybakov N. P., Belov S. V., Chervinchuk S. J., Koshurnikov A. V., Pushkarev P. J., Chernjavets V. V. *Podvodnaia geofizicheskaia stantsiia* [Underwater Geophysical Station]. Patent RU, no. 2435180, 2010.
14. 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"], Section 2, Vladivostok, 2011, pp. 220–224 (In Russian).
15. 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 seismogidroakusticheskaja stantsiia 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.
16. 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).
17. Buoy M. S., Flores P. E., Hill D., Palmer E., Ross R., Walker R., Haubirs 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).
18. Martynova L. A. Concerted Action of a Radiator and Autonomous Uninhabited Submersibles for Effective Seismic Exploration. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 83–92 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83