

УДК 550.837.73

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТАНОВКИ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРЯМЫХ ПОИСКОВ УГЛЕВОДОРОДОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БУКСИРУЕМЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОС

Г.Я. Шайдуров, В.А. Детков, Р.Г. Шайдуров

*Военно-инженерный институт Сибирского федерального университета,  
660036, Красноярск, Академгородок, 13А, Россия*

Дается расчетная оценка электрических и сейсмических сигналов сейсмоэлектрического эффекта над залежью углеводородов в море с возбуждением сейсмических ударов импульсными невзрывными источниками и приемом автоматическими подводными аппаратами. Описывается требуемый аппаратный комплекс, рассматриваются методы подавления реверберационных помех.

*Сейсмоэлектрический эффект, поиск, углеводороды, море, помехи, подводные, аппараты, Арктика*

## ON THE POSSIBILITY OF DEVELOPING A SEISMOELECTRICAL METHOD FOR DIRECT HYDROCARBON PROSPECTING IN THE ARCTIC SEAS WITHOUT THE USE OF A STREAMER CABLE

G.Ya. Shaidurov, V.A. Detkov, R.G. Shaidurov

We provide an analytical assessment of electrical and seismic signals of the seismoelectrical effect over a hydrocarbon deposit in the sea with seismic wave excitation using pulsed nonexplosive sources and reception by automatic underwater vehicles. The hardware complex required for the implementation of the method is described. Methods for suppressing reverberation interference are considered.

*Seismoelectrical effect, hydrocarbon prospecting, sea, interference, underwater vehicles, Arctic*

### ВВЕДЕНИЕ

Сейсмоэлектрический эффект на основе взаимодействия электромагнитных и акустических колебаний в ионно-проводящих средах (Земле, морской воде, электролитах) сегодня достаточно широко начал использоваться в различных практических задачах в геофизике, медицине, связи.

Различают три рода электроакустических эффектов:

— первого рода  $J$ -эффект, заключающийся в изменении электрического сопротивления среды под действием упругих колебаний;

— второго рода  $E$ -эффект — возникновение разности потенциалов между двумя электродами при возбуждении пространства между ними ультразвуковыми колебаниями, т. е. возникновение электромагнитного поля электрокинетического происхождения;

— третьего рода, или эффект Дебая, как возникновение волны электрических потенциалов в ионно-проводящей среде на частоте воздействующих упругих колебаний.

Первыми публикациями по исследованию этих эффектов являются работы [Иванов, 1939, 1940; Френкель, 1944].

Проблемы применения в геофизике как типично ионно-проводящей среде освещены в публикациях [Потапов и др., 1995; Светов, Губатенко, 1999; Губатенко и др., 2002; Berg, 2005; Добрынин и др., 2012]. Постановка сейсмоэлектрического метода (СЭМ) в арктических условиях, в том числе в подводном исполнении приведены в статьях и патентах [Левицкий и др., 2010; Шон и др., 2013; Костылев, Зуев, 2014; Гайкович и др., 2018; Семенов и др., 2019; Шайдуров, 2021], в которых в основном рассматриваются варианты аппаратных средств поиска, стационарно установленных на морском дне.

В США [Brizard, 2015] запатентован сейсмоэлектрический способ поиска углеводородов с дополнительной подсветкой электрическим полем, названный как «бинарный эффект», позволяющий, по мнению автора, существенно увеличить чувствительность метода при работе на больших глубинах за счет синергетического взаимодействия двух видов полей.

Для оценки возможностей постановки пассивного сейсмоэлектрического метода с извлечением информации из шумов Земли можно использовать работы [Лисейкин и др., 2021; Плоткин, Потапов, 2022; Павленко, 2022].



**Рис. 1. Водный сейсмоисточник «Енисей ВЭМ-50».**

В опытных работах в 2016 г. на р. Нижняя Тунгуска производились сравнительные испытания невзрывных сейсмоисточников «Енисей ВЭМ-50» электромагнитным приводом (В.А. Детков, ОАО «Енисейгеофизика») и с пневмопушками (В.С. Селезнев, СНИИГГиМС и ГС СО РАН) [Детков, 2020].

В морских условиях для возбуждения приема отраженных  $E$  и  $S$  сигналов используются длинные буксируемые косы (свыше 1000 м), а в качестве сейсмоисточников — пневматические излучатели (пневмопушки), что усложняет и удорожает проведение работ, особенно в арктических районах при наличии ледяного покрова.

Понятно, что подобная технология требует для развертывания много времени, что существенно снижает производительность труда. Кроме того, кавитационные зоны пневмопушек небезопасны для живых обитателей моря.

Рассмотрим возможность прямых поисков углеводородов в море сейсмoeлектрическим методом (СЭМ) в движении без дополнительной подсветки электрическим полем с применением автоматических подводных аппаратов (АПА). При этом вместо пневмопушек в качестве сейсмоисточников предлагается использовать экологически безопасные импульсные невзрывные источники с электромагнитным приводом типа «Енисей ВЭМ-4» или «Енисей ВЭМ-50», успешно испытанные на реках Ангара, Бирюса, Нижняя Тунгуска [Алешечкин и др., 2010].

На рисунке 1 показан поисковый сейсморазведочный комплекс в виде буксируемой за катером платформы с шестью сейсмоисточниками «Енисей ВЭМ-50» и силой удара каждого  $5 \cdot 10^5$  Н.

Прием сигналов в обоих случаях осуществлялся на береговую сейсмоксу.

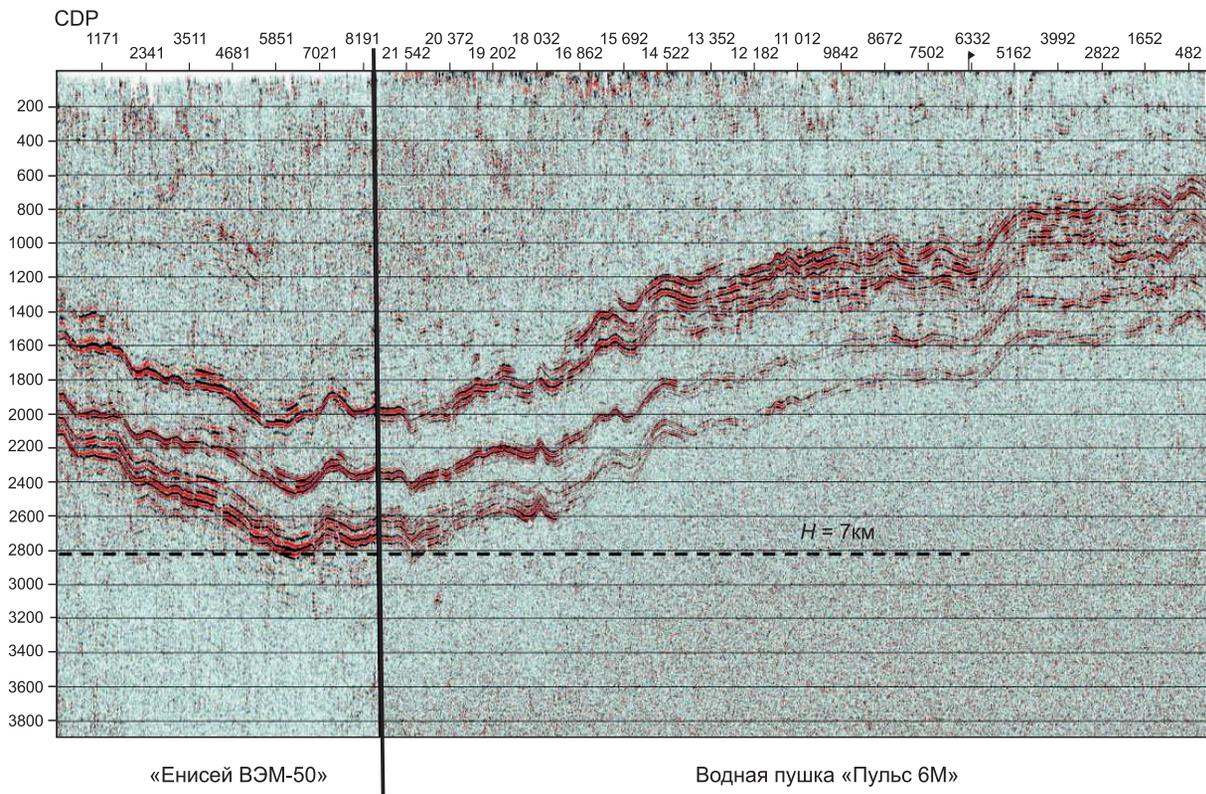
Сейсмические разрезы, полученные обоими вариантами, приведены на рис. 2. Как видно из записей, обе системы дали достаточно четкие отражения на Ангаро-Котуйском рифейском прогибе с глубиной до 7 км.

Работы с источником «Енисей ВЭМ-50» на указанных выше реках подтвердили, что экологически безопасные импульсные невзрывные источники с электромагнитным приводом вполне могут быть использованы в морской сейсморазведке.

## РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ

Ниже дается расчетная оценка величины электрического поля при действии на углеводородную залежь сейсмического излучения от стороннего источника. При этом давление сейсмической волны на границу раздела углеводорода с окружающей горной породой приводит к появлению в среде углеводорода дополнительного электрического заряда за счет смещения поверхности залежи в электростатическом поле Земли. В этой модели залежь углеводорода представляется как конденсатор, потенциал которого колеблется синхронно с полем сейсмического давления [Шайдуров, 2020].

В расчетной схеме импульсный невзрывной источник располагается в районе кормы базового геофизического судна ниже ватерлинии, а приемники сейсмического и электрического сигналов помещены в корпусе АПА, двигающегося впереди судна по его курсу на расстоянии  $D \geq 200$  м (рис. 3). Электропроводность морской воды соответствует  $\sigma_1 = 4$  См/м, а глубина моря  $h_1 = 100$  м. Продуктивный газовый пласт площадью  $S_T = L_1 \cdot L_2 = 3000 \times 1000$  м<sup>2</sup> и мощностью  $h_4 = 10$  м располагается на глубине



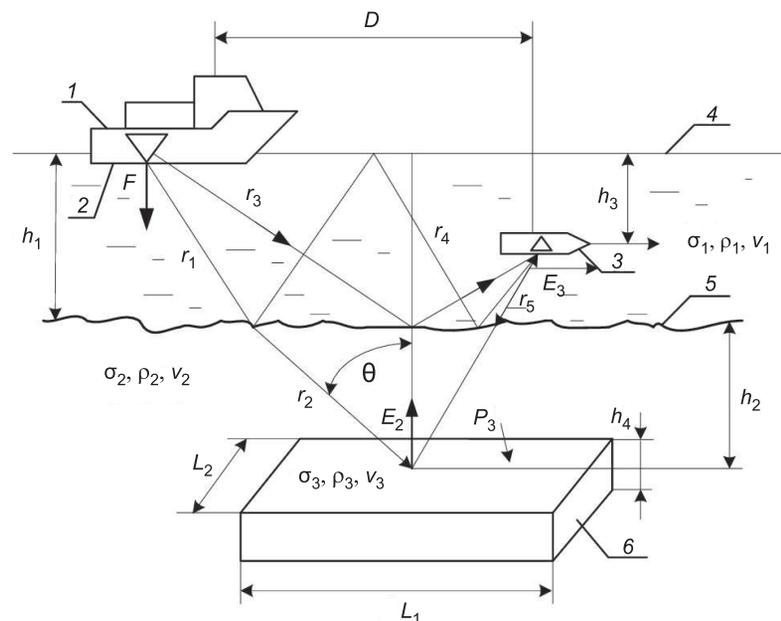
**Рис. 2. Сейсмический разрез.**

Река Нижняя Тунгуска, Ангаро-Кокуйский рифейский прогиб, 2014 г. М-б по вертикали 1.4 см/км.

$h_2 = 1000$  м. Электропроводность газовой среды пласта  $\sigma_3 = 10^{-5}$  См/м, плотность  $\rho_3 = 100$  кг/м<sup>3</sup>, скорость распространения продольных сейсмических волн в газе  $v_3 = 500$  м/с.

Замена пористой насыщенной газом среды однородным пластом корректна, поскольку формирование сейсмоэлектрического эффекта происходит в тонком миллиметровом слое, определяемым длительностью падающего на пласт сейсмического импульса, плотностью и скоростью продольной сейсмической волны 500 м/с как интегральных характеристик для пористых сред с капиллярным содержанием газа.

Для более точной оценки необходимо использовать этот параметр по экспериментальным или расчетным данным. В случае нефте-содержащей породы в расчете необходимо применять соответствующие этой среде скорость сейсмической волны и ее плотность. Мощность пласта и его размеры определяют суммарный заряд, получаемый от сейсмического удара при смещении его поверхности в статическом электрическом поле Земли.



**Рис. 3. Расчетная схема для оценки электрического поля СЭ эффекта пластовой залежи газа.**

1 — геофизическое судно; 2 — сейсмический излучатель; 3 — автоматический подводный аппарат; 4 — поверхность моря; 5 — морское дно; 6 — продуктивный пласт углеводородов.

Давление сейсмического удара на поверхность пласта для дальней зоны источника оценим как [Гуревич, Боганик, 1980]:

$$P_3 = \frac{4F_1\eta}{\pi R u^2} \cdot \frac{\lambda_{S_1} B_p}{r_1 + r_2} e^{-\alpha r_{12}} \cos \theta = 1.6 \cdot 10^4 \text{ Па.} \quad (1)$$

Здесь  $\lambda_{S_1} = \frac{v_1}{f_S}$  — кажущаяся длина волны, соответствующая первой зоне Френеля;  $f_S = \frac{1}{2\tau} = 100$  Гц — средняя частота спектра импульса источника длительностью  $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$  с;  $\theta$  — угол падения волны на пласт;  $r_{12} = r_1 + r_2 = 1100$  м — расстояние между источником и поверхностью пласта.  $\alpha = 10^{-4}$  1/м — коэффициент поглощения сейсмической волны горной породой.

$$B_p = \frac{2\rho_2 v_2}{\rho_2 v_2 + \rho_3 v_3} \approx 1 \text{ —} \quad (2)$$

коэффициент прохождения сейсмической волны в продуктивный пласт.

Поглощение в воде на участке излучатель—дно ввиду малости не учитываем. Смещение верхней границы пласта под действием сейсмического удара определяется через решение дифференциального уравнения Ньютона:

$$m \frac{\delta^2 Z}{\delta t^2} + \frac{F_c}{v_3} \cdot \frac{\delta Z}{\delta t} - F_3 = 0, \quad (3)$$

где  $m = v_3 \tau \cdot S_1 \rho_3$  — масса смещаемой среды пласта, определяемая глубиной прохождения удара в среду пласта за время длительного импульса  $\tau$ ;  $S_1 = \lambda_{S_3}^2 = \left(\frac{v_3}{f_S}\right)^2$  — площадь волновой зоны Френеля на поверхность пласта;  $F_3 = P_3 S_1$  — сила удара на поверхность пласта;  $F_c$  — сила сопротивления среды пласта;  $Z$  — смещение поверхности пласта под ударом сейсмического импульса.

Решение (3) дает

$$Z = \frac{1}{\left(1 + \frac{P_c}{v_3 m}\right)} \cdot \frac{P_3 \tau}{v_3 \rho_3}. \quad (4)$$

Напряженность электрического поля в пласте, создаваемой под действием удара сейсмической волны, можно оценить как

$$E_2 = E_0 \frac{Z}{h_4}, \quad (5)$$

где  $E_0 = 120$  В/м — напряженность естественного электрического поля Земли, обуславливающая полный заряд пласта. Возникающий через элемент пласта ток определим как

$$I_3 = E_2 \cdot \lambda_{S_3}^2 \cdot \sigma_3. \quad (6)$$

Общий ток, проходящий через всю поверхность пласта, будет выше на величину  $n = \frac{L_1 \cdot L_2}{\lambda_{S_3}^2}$ :

$$I_{3\Sigma} = E_0 \sigma_3 L_1 L_2 \cdot \frac{Z}{h_4}. \quad (7)$$

По данным наших экспериментов, на Минусинском газоконденсатном месторождении расчетная зависимость напряженности вторичного электрического поля над продуктивным газовым пластом носит двугорбый характер, что соответствует полю вертикального электрического диполя с током  $I_{3\Sigma}$ .

Под действием этого тока электрический заряд всего пласта составит:

$$Q_S = I_{3\Sigma} \cdot \tau. \quad (8)$$

С учетом (6), (7)

$$Q_S = \frac{E_0 \sigma_3 \tau L_1 L_2}{h_4}. \quad (9)$$

Плотность тока, вызванная этим зарядом в точке наблюдения,

$$j_X = \frac{I_{3\Sigma} K}{4\pi(r_2 + r_5)^2}, \quad (10)$$

где  $K = e^{-(\beta_1 r_5 + \beta_2 r_2)}$  — коэффициент поглощения электрического поля в воде и горной породе. Поскольку  $j_X = \sigma_1 E_3$ , то модуль напряженности электрического поля в точке приема:

$$E_3 = \frac{E_0 \sigma_3 L_1 L_2 Z \cdot e^{-(\beta_1 r_5 + \beta_2 r_2)}}{4\pi \sigma_2 h_4 (r_2 + r_5)^2}. \quad (11)$$

Для следующих частных параметров:  $E_3 = 120$  В/м;  $\sigma_3/\sigma_2 = 10^{-2}$ ;  $L_1 \cdot L_2 = 3 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>;  $Z = 1.6 \cdot 10^{-4}$  м;  $r_{12} = 1100$  м;  $K = 0.22$ , величина  $E_3 = 3.8$  мкВ/м.

Полученные оценки хорошо совпадают с данными эксперимента [Шайдунов, 2020], что позволяет рекомендовать эту методику для расчетов перед подстановкой поисковых работ.

Оценка  $E_3$  сделана для частоты переменной составляющей электрического поля  $f_s = 10$  Гц, средней в спектре 0.1—20 Гц, определяемым фильтром нижних частот на входе приемника электрического поля.

В множителе поглощения этого поля морской водой на участке  $r_1 = 100$  м величина  $e^{-\beta_1 r_1} = 0.28$ , а в горной породе, при  $r_2 = 1000$  м,  $e^{-\beta_2 r_2} = 0.8$ .

Таким образом, морская вода вносит существенный вклад в поглощение переменного электрического поля в точке наблюдения.

По этой причине расстояние движения АПА относительно дна моря необходимо минимизировать.

Далее определим достигаемое отношения сигнал/шум в электрическом канале по результатам наблюдений гидродинамических шумов движения, полученных с буксируемой электрической антенны длиной 300 м в подводном положении со скоростью 3 м/с [Калашников и др., 1980].

По этим данным такого рода шумы не превышали 180 дБ относительно 1 В/Гц<sup>1/2</sup>, или в полосе частот 100 Гц  $E_{\text{ПП}} = 10^{-9}$  В/м.

Атмосферные помехи на глубине 25 м в полосе частот 100 Гц составляли величину  $E_{\text{П}} = 10^{-8}$  В/м. Таким образом, как гидродинамические, так и атмосферные шумы в подводном положении ожидаются на два порядка ниже расчетного уровня электрического сигнала сейсмоэлектрического метода.

## ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО КАНАЛА

Основными помехами сейсмического канала являются реверберации отражений от поверхности воды и донного грунта в точке приема. Давление сейсмической волны, отраженной от дна моря, оценивается в дальней зоне излучателя как

$$P_{\text{ПП}} = P_1 \frac{\lambda_{S_1}}{2r_3} B_1, \quad (12)$$

где  $P_1 = \frac{4F_1 \eta}{\pi R u^2}$  — давление удара под опорной плитой излучателя  $Ru$ ;  $\lambda_{S_1} = \frac{v_1}{f_s}$  — размер первой зоны Френеля в воде;  $\eta = 0.7$  — КПД сейсмоисточника;  $v_1 = 1400$  м/с — скорость акустических волн в воде;  $f_s = 100$  Гц — рабочая частота;  $r_3$  — расстояние, проходимое отраженной волной;  $B_1$  — коэффициент отражения от данного грунта.

$$B_1 = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2}. \quad (13)$$

Подстановка этих параметров в (12) дает

$$P_{\text{ПП}} = 7.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^2 = 7.5 \cdot 10^4 \text{ Па}. \quad (14)$$

Для сравнения удельное давление отраженной от пласта сейсмической волны в районе приемного геофона составит:

$$P_4 \approx P_3 \cdot \frac{\lambda_{S_3}}{r_1} \cdot \frac{\rho_2 v_2 - \rho_3 v_3}{\rho_2 v_2 + \rho_3 v_3} = 75 \text{ Па}, \quad (15)$$

где  $\rho_2 = 2000$  кг/м<sup>3</sup>;  $v_2 = 4000$  м/с;  $\rho_3 = 100$  кг/м<sup>3</sup>;  $v_3 = 500$  м/с — соответственно плотности сред и скорости прохождения сейсмических волн в горной породе и продуктивном пласте газа.

Отношение полезного сигнала реверберационной помехи (РВП)

$$\frac{P_4}{P_{\text{рп}}} = \frac{75}{7.5 \cdot 10^4} = 10^{-3}. \quad (16)$$

Поскольку уровень полезного сейсмического сигнала на три порядка меньше РВП, необходимо найти способ подавления этой помехи.

В традиционном варианте морской сейсморазведки, когда прием ведется одновременно на множество гидрофонов буксируемой косы, подавление РВП производится путем групповой обработки сигналов от десятка и более гидрофонов, удаленных от пневмопушек.

В описываемой технологии для подавления РВП можно использовать адаптивные цифровые фильтры типа Калмана [Ван-Трис, 1972; Грант и др., 1988], выделяющие сигналы РВП в процессе движения всего поискового комплекса и вычитающие их из наблюдаемой на выходе гидрофона совместной реализации сигнала и помехи.

Алгоритм работы адаптивного фильтра заключается в минимизации разности между наблюдаемой реализацией смеси полезного сейсмического сигнала, отраженного от продуктивного пласта  $U(t)$  и помехи РВП  $U_{\text{рп}}(t)$ , которую можно получить в нормальной зоне в начале профиля движения АПА:

$$[U(t) - U_{\text{рп}}(t)]^2 \rightarrow \min. \quad (17)$$

Автокомпенсация РВП повышает амплитудную динамику приемника сейсмического канала. Одновременно разница по времени прихода РВП и полезного сигнала дает дополнительную возможность отстроиться от этой помехи, поскольку задержка прихода РВП первого отражения от дна составляет  $t_{\delta} = \frac{2r_3}{v_1} = \frac{280}{1400} = 0.2$  с, а задержка полезного сигнала  $t_3 \approx \frac{2(r_1 + r_2)}{v_2} = 0.5$  с.

В процессе движения АПА в нормальной зоне фильтр Калмана за время 0.2 с подстраивает передаточную функцию фильтра под РВП. В дальнейшем производится лишь подстройка параметров этой функции.

#### АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Сейсмоисточник и АПА целесообразно разместить с обоих бортов на корме геофизического судна ледового класса в виде спускаемых в воду опорных платформ.

В нерабочем положении эти платформы поднимаются выше ватерлинии с помощью гидравлических рельсовых подъемников, а при начале движения опускаются в воду.

На рисунке 4 показана схема бортового оборудования АПА, включающая датчики электромагнитного поля в виде заводненного по концы электрического диполя или приемные магнитные антенны.

Сейсмический сигнал принимается гидрофоном. Для запоминания и предварительной обработки принимаемых сигналов используется микроконтроллер.

Обратная связь с сопровождающим судном обеспечивается через гидроакустический канал в составе приемопередатчика и акустической фазированной антенной решетки.

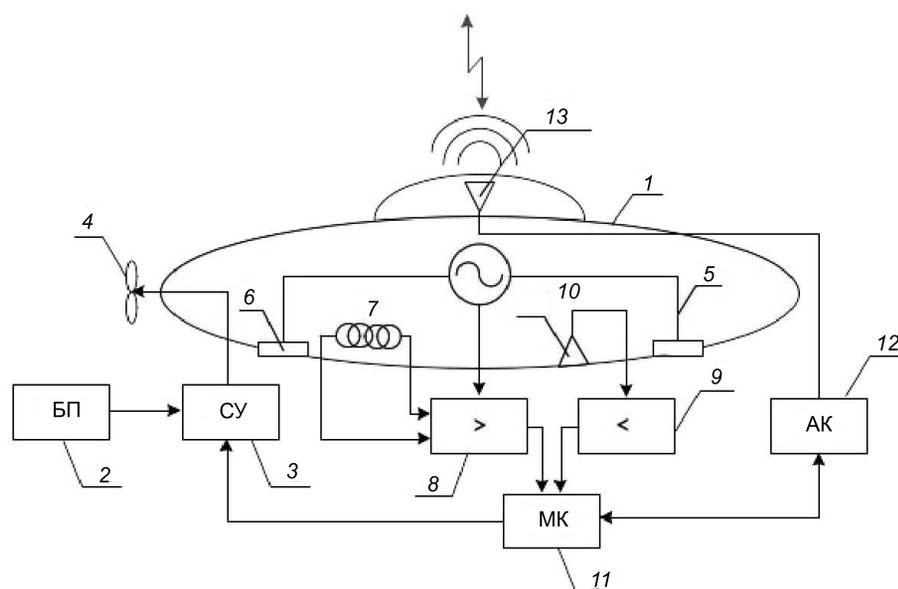
При глубине исследования до 1000 м достаточно двух излучателей с силой удара каждого  $3.3 \cdot 10^5$  Н. Поскольку, согласно (11), амплитуда электрического сигнала СЭ эффекта падает с глубиной исследования как  $1/r^3$ , то для работы на глубину 2000 м необходимо увеличить силу удара и довести ее до  $3 \cdot 10^6$  Н. Это потребует установки на опорные платформы судна четырех излучателей типа «Енисей ВЭМ-50» с общей массой 20 т.

Радикальным решением в целях уменьшения массы источников может быть переход на излучение широкополосных сейсмических сигналов с псевдослучайной модуляцией, т. е. переход на ШПС-технологию. В научной печати [Askeland et al., 2012; Кострыгин, Колесников, 2012] такая технология уже обсуждалась.

Проектом по гранту РФ 18-45-242003 в лаборатории электроакустики СФУ разработан и испытан сейсмический источник ЭМСИ-Ш для работы на мелководье и шельфе морей с излучением ортогональных сигналов, кодированных М-псевдослучайным кодом, с силой удара 30 кН и массой в 250 кг.

Особенностью этого источника является излучение двухполярных сигналов, позволяющих производить кодирование смены знака фазы, как это производится в космической радионавигационной системе «Глонасс».

При длительности посылки в 10 с подобное кодирование с длительностью элемента сигнала 10 мс позволяет получить базу последовательности  $B = 1000$ . Это равносильно тому, что при одиночном ударе в 30 кН эквивалентная сила удара составит  $10^3$  кН.



**Рис. 4. Схема бортового оборудования АПА.**

1 — корпус АПА; 2 — блок электропитания; 3 — система управления; 4 — винт АПА; 5, 6 — заводнители; 7 — индукционный датчик; 8, 9 — предусилители; 10 — гидрофон; 11 — микроконтроллер; 12 — приемопередатчик акустического канала (АК); 13 — фазированная антенная решетка АК.

Здесь учитывается зависимость отношения сигнал/шум при накоплении  $n$ -элементов как  $\sqrt{n}$ .

Если принять минимально регистрируемый уровень сигнала на выходе приемного электрического диполя длиной 3 м в 1 мкВ, то требуемая напряженность электрического поля составит  $E_{\chi} = 0.3$  мкВ/м. С учетом линейной зависимости  $E_{\chi}$  от силы удара источника его величина для обеспечения глубины поиска 1000 м составит  $F_1 = 10^2$  кН, а для глубины 4000 м  $1.6 \cdot 10^3$  кН.

По опыту работы авторов на суше пассивным методом [Шайдуров и др., 2018] с извлечением информации из естественных электромагнитных и сейсмических шумов Земли в диапазоне частот 0.1—20 Гц целесообразно произвести проверку пассивного метода в морских условиях и на реках. В этом варианте отпадает необходимость использовать на сопровождающем АПА судне активных источников сейсмических ударов, что существенно упрощает и удешевляет постановку работ.

На сегодня как в России, так и за рубежом для различных оборонных и гражданских задач успешно применяются разнообразные АПА [Гайкович и др., 2018].

На рынке этих изделий всегда можно найти подходящие конструкции для использования в качестве носителей приемной аппаратуры с минимальной доработкой для реализации, описанной выше технологии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получено системное соотношение для оценки напряженности электрического поля сейсмоэлектрического эффекта над газовой залежью в море.

2. Для снижения затрат при проведении работ сейсмоэлектрическим методом в ледовой обстановке арктических морей предложено использовать вместо длинных буксируемых кос комплекс из геофизического судна с бортовыми сейсмоисточниками и приемниками сигналов, размещаемых на автоматических подводных аппаратах, управляемых по гидроакустическому каналу.

3. Для обеспечения экологической безопасности морской фауны в качестве источников сейсмической волны рекомендуется использовать вместо пневмопушек импульсные взрывные излучатели с электромагнитным приводом.

4. Для подавления реверберационных помех в сейсмическом канале необходимо применять адаптивные цифровые фильтры.

Работа выполнена с поддержкой гранта РФФИ № 20-07-00267.

## ЛИТЕРАТУРА

**Алешечкин А.М., Валиханов М.М., Кокорин В.И., Фатеев Ю.Л., Шайдунов Г.Я.** Экспериментальные работы на реках «Бирюса» и «Чуна» по координатной привязке водных вариантов импульсного невзрывного источника «Енисей» с использованием РНС Глонасс (GPS) // Приборы и системы разведочной геофизики, 2010, № 2 (32), с. 39—41.

**Ван-Трис Г.** Теория обнаружения, оценок и модуляции. М., Сов. радио, 1972, 744 с.

**Гайкович Б.А., Занин В.Ю., Тарадонов В.С., Блинков А.П., Кожемякин И.В., Токарев М.Ю., Бирюков Е.А.** Концепция роботизированной подводной сейсморазведки в подледных акваториях // Сборник работ лауреатов Международного конкурса научно-технических разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2018 г. М., 2018, с. 64—86.

**Грант П.М., Коуэн К.Ф., Фридлиндер Б. и др.** Адаптивные фильтры. М., Мир, 1988, 381 с.

**Губатенко В.П., Светов Б.С., Московский И.Г.** Электромагнитное поле механоэлектрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах. Расчеты в горизонтально-слоистых средах // Физика Земли, 2002, т. 2, № 2, с. 34—50.

**Гуревич И.И., Боганик Г.Н.** Сейсмическая разведка. М., Недра, 1980, 541 с.

**Детков В.А.** К 40-летию импульсного источника «Енисей»: вчера, сегодня, завтра // Приборы и системы разведочной геофизики, 2020, № 4 (71), с. 32—35.

**Добрынин С.И., Головин С.В., Бобровников Л.З., Мелаев Д.В.** Инновационная технология оценки и мониторинга запасов углеводородов в разрабатываемом нефтегазовом пласте // Инженер-нефтяник, 2012, № 2, с. 24—29.

**Иванов А.Г.** Эффект электризации пластов земли при прохождении через них упругих волн // Докл. АН СССР, 1939, т. 24, № 1, с. 41—43.

**Иванов А.Г.** Сейсмoeлектрический эффект второго рода // Изв. АН СССР. Геология и геофизика, 1940, № 5, с. 18—21.

**Калашников Н.И., Дудкин Ф.Л., Николаенко Ю.В.** Основы морской электроразведки. Киев, Наук. думка, 1980, 198 с.

**Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А.** Исследование возможностей кодоимпульсного метода сейсмической разведки. Приборы и системы разведочной геофизики, 2012, № 03 (41), с. 73—79.

**Костылев К.А., Зуев В.А.** Подводно-подледная донная сейсморазведка // Современные проблемы науки и образования, 2014, № 6, с. 308—315.

**Левицкий Н.В., Детков В.А., Мегеря В.М., Шайдунов Г.Я.** О технологии сейсмических исследований глубоководных районов дна Северного Ледовитого океана // Технологии сейсморазведки, 2010, № 3, с. 75—79.

**Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Брыксин А.А., Севостьянов Д.Б., Кречетов Д.В., Коковкин И.В.** Возможности речной сейсморазведки для изучения строения земной коры и верхней мантии территории Сибири // Геология и геофизика, 2023, т. 64 (2), с. 280—292.

**Павленко О.В.** Записи местных землетрясений как основа для корректных оценок сейсмических воздействий (на примере трассы второго Северомуйского тоннеля). Геология и геофизика, 2022, т. 63 (2), с. 247—263.

**Плоткин В.В., Потапов В.В.** Магнитотеллурическое зондирование в Арктике с использованием станции на дрейфующей льдине (численный эксперимент) // Геология и геофизика, 2022, т. 63 (8), с. 1167—1181.

**Потапов О.А., Лизун С.А., Кондрат В.Ф.** Основы сейсморазведки. М., Недра, 1995, 268 с.

**Райс Ш.Л., Дадли Т., Шнайдер К., Пирс Р.Дж., Хорн Б., Кэмерон С., Роберт Б., Чжоу Ч.Ч.** Регистрация и обработка сейсмических данных в арктических условиях / Приборы и системы разведочной геофизики, 2013, № 4 (45), с. 83—95.

**Светов Б.С., Губатенко В.П.** Электромагнитное поле механоэлектрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах. Постановка задачи // Физика Земли, 1999, т. 1, № 10, с. 67—73.

**Семенов В.Б., Торопов Е.Е., Бородулин В.Л., Гинтовт А.Р.** Способ подводной сейсморазведки и устройство для его осуществления. Патент РФ RU2696820C1. Бюл. № 22 от 06.08.2019, 22 с.

**Френкель Я.И.** К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР. Серия География и геофизика, 1944, № 4, с. 133—150.

**Шайдунов Г.Я.** Методика системного анализа сигналов сейсмoeлектрического эффекта при поиске углеводородов. Приборы и системы разведочной геофизики. Саратов, 2020, № 4 (71), с. 33—37.

**Шайдунов Г.Я.** Система подводной сейсморазведки на море. Патент РФ № 2755001, Бюл. № 25 от 08.09.2021, 13 с.

**Шайдулов Г.Я., Кудинов Д.С., Потылицын В.С., Шайдулов Р.Г.** О наблюдении сейсмоэлектрического эффекта на газоконденсатном месторождении в естественных электромагнитных и сейсмических шумах Земли в диапазоне 0.1—20 Гц // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (5), с. 703—708.

**Askeland B., Hobæk H., Mjelde R.** Marine seismics with a pulsed combustion source and Pseudo Noise codes. *Mar. Geophys. Res.*, 2007, v. 28, p. 109–117, doi: 10/1007/S-11001-007-9018-5.

**Berg A.** Method of Seismo-Electromagnetic Detecting of Hydrocarbon Deposit. US Patent № 7330790, October 2005, Appl. No. 11/241, 643, 7 p.

**Brizard T.** Jet-pump operated autonomous underwater vehicle and method for coupling to ocean bottom during marine seismic survey. AU2014213981. 2015, 57 p.