

М. Р. Либерзон, д-р физ.-мат. наук, проф., mark@fund.ru,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

Технология ГЕОНОД: состояние и перспективы автоматизации и управления

Сейсморазведка — необходимая составляющая эффективного использования нефтегазовых месторождений морского шельфа, так как стоимость бурения скважины на шельфе в сотни раз дороже бурения скважины на суше, а предварительная морская сейсморазведка может помочь избежать неоправданных затрат.

Высокое качество морской сейсморазведки возможно получить только с помощью донных технологий: на исследуемый участок морского дна опускают специальные донные станции, которые улавливают прямые и отраженные от морского дна акустические сигналы, генерируемые на поверхности акустическим излучателем. Полученные акустические сигналы станции фиксируют и записывают. После того как данные записаны, станцию поднимают на поверхность, записанные данные скачивают со станции на специальные устройства для последующей интерпретации. В результате на основе полученных данных составляют детальную 2D- или 3D-карту вероятных залежей нефти и газа. Полученные карты используют для определения точных координат установки буровых станций.

Самой распространенной технологией морской сейсморазведки является применение донных станций на фале (веревке). Первые разработки донных станций на фале начались в 70-е годы прошлого века и не предполагали средств автоматизации работ с донными станциями. Все операции съема и прикрепления фала к станции, погружения и подъема станции, а также ряд других операций выполнялись вручную. На сегодняшний день фактически не появилось какой-либо эффективной автоматизации в работе со станциями на фале. Кроме того, использование фала приносит в морскую сейсморазведку множество других негативных явлений и трудностей. Вот лишь несколько из них: зацепления фала за неровности дна и возможные препятствия, что влечет потерю или порчу станций, обрыв фала; необходимость иметь на судне достаточно места для хранения фала и лебедок для фала, что ведет к использованию габаритных судов и как следствие — к невозможности вести сейсморазведку на малых глубинах и в приливно/отливных транзитных зонах; фал, соединяющий станции на дне, производит сейсмический шум, что сильно ухудшает качество получаемых данных; невозможность вести сейсморазведку в местах, где находятся другие суда (например, рыболовецкие), и т. п.

Разработанная в течение нескольких последних лет новая отечественная технология морской сейсморазведки ГЕОНОД позволяет решить указанные и многие другие проблемы. Многие из этих проблем вообще не возникают, так как в технологии ГЕОНОД фалы не используются, а работа ведется с помощью автономных самовсплывающих донных станций (АСДС).

В статье рассматривается ряд задач прикладной механики и управления, возникающих при использовании технологии ГЕОНОД: управление движением станции при погружении и при всплытии, обеспечение точности установки станции в заданную точку на дне, сбор станций после их подъема на поверхность и др.

Ключевые слова: технология сейсморазведки, углеводороды, морской шельф, самовсплывающие донные станции

Технологии разведки месторождений углеводородов на шельфе

Процессы добычи нефти и газа на месторождениях под морским дном — на шельфе — существенно отличаются от добычи нефти и газа на суше главным образом по следующей причине. Для бурения скважин в морском дне используются специальные буровые установки, например, такие, как показано на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Стоимость эксплуатации такой буровой установки исключительно высока и может достигать до 1 млн долларов США в день, стоимость бурения скважины на шельфе в сотни раз превосходит стоимость бурения скважины на суше. Поэтому необходимо выбрать та-

кое место на шельфе для бурения, в котором с большой степенью вероятности есть месторождение нефти и газа, чтобы по возможности избежать неоправданных затрат. В этом помогает проведение предварительной разведки.

Предварительная разведка на шельфе с целью достаточно достоверно определить наличие в данном месте месторождения нефти и газа ведется уже на протяжении нескольких десятилетий в различных регионах мира. Разработчики и пользователи технологий такой разведки остановились на методе сейсмической разведки на базе работы специальных донных станций. Станции опускают на дно и расставляют на некоторой площади. По поверхности воды над станциями барражирует судно с акустическим излучателем. Станция

на дне улавливает прямой акустический сигнал от судна и сигналы, отраженные морским дном. Эти сигналы фиксирует и записывает станция. Затем она поднимается на поверхность, записанные сигналы передаются на специальный сервер, который на основе сравнения зафиксированных станцией прямого и отраженного от морского дна акустических сигналов определяет плотность породы и наличие пустот под морским дном в исследуемом месте, т. е. вероятность существования месторождений нефти и газа. После этого станции перевозятся на соседний участок морского шельфа, и сейсморазведка осуществляется на нем. В результате создается карта исследованного шельфа с указанием участков вероятных месторождений нефти и газа и объемов этих месторождений.

Самой распространенной и применяемой в мире технологией сейсморазведки на шельфе является технология американской компании *FairfieldNodal*. Известны и другие технологии, но на их долю остается сейсморазведка лишь небольшой части мирового шельфа. Так, на протяжении многих лет компания *Fairfield-Nodal* выполняет сейсморазведку более чем на 90 % площади морского шельфа России. Такая же картина и в других регионах мира.

Около 10 лет назад группа российских специалистов под руководством Д. А. Ильинского начала разработку новой технологии ГЕОНОД сейсморазведки углеводородов на морском шельфе [1—4]. В 2011—2012 гг. технология ГЕОНОД уже была в такой стадии разработки, что была апробирована, применена в реальных условиях и на Международной конференции "Шельф России 2012" была признана лучшей геологоразведочной технологией в мире. Это объясняется тем, что технология ГЕОНОД ни по каким параметрам не уступает существующим технологиям, а по многим превосходит их. Кроме того, ряд изобретений, внедренных при разработке технологии ГЕОНОД, а также комплекс задач по прикладной механике и теории управления, по которым в некоторой части решения получены, а в остальном задачи продолжают решаться, ставит технологию ГЕОНОД в преимущественное положение по сравнению с другими аналогичными технологиями. Ниже будут показаны некоторые аспекты сравнения технологии ГЕОНОД с существующими аналогами.

Сравнение различных технологий сейсморазведки

Основные параметры различных технологий сейсморазведки на шельфе показаны на рис. 2 [5—16]. Очевидны преимущества технологии ГЕОНОД практически по всем параметрам по отношению к другим технологиям. Автономное время работы, производительность и ряд других технических характеристик, несомненно, играют значительную роль при сравнении технологий. Отметим, что глубина до 7000 м, на которой могут работать станции ГЕОНОД, не имеет аналогов. В настоящее время на всех шельфах мира сейсморазведка ведется на глубинах до 250...300 м. Таких неразведанных шельфов еще много в различных регионах. Но уже через несколько лет придется переходить к сейсморазведке углеводородов на значительно больших глубинах. Например, по всей длине средиземноморского шельфа Израиля предполагаются очень большие запасы нефти и газа, которые до сих пор не разведаны. Рельеф морского дна здесь таков, что при удалении от берега глубина резко возрастает и уже на расстоянии 50...60 км достигает 2500...3000 м, а дальше еще глубже. Очевидно, что получение достоверных результатов сейсморазведки на этом шельфе будет возможно лишь с применением технологии ГЕОНОД. Подобных шельфов много и в других регионах мира. Еще одно преимущество станции ГЕОНОД состоит в том, что ее корпус изготовлен из радиопрозрачного материала в отличие от станций, применяющихся в других технологиях. Все использующиеся в мире технологии сейсморазведки на шельфе предполагают, что по окончании работы станции на морском дне ее необходимо поднять на поверхность с помощью фала (веревки), а затем на палубе судна вскрыть корпус станции, подсоединить провода и переписать на сервер информацию со станции. Станция ГЕОНОД, оказавшись на поверхности воды, сразу же передает информацию на сервер дистанционно сквозь радиопрозрачный корпус. Особое значение имеет тот факт, что технология ГЕОНОД не использует фалы для опускания, подъема и перемещения станций, без чего не может обойтись ни одна другая технология. Некоторые негативные явления, возникающие в результате использования фалов, упомянуты выше в аннотации. На рис. 3 (см.

Производитель	СЕЙСМО-ШЕЛЬФ Россия	Fairfield Nodal Z700 США	Fairfield Nodal Z3000 США	Seabird CASE Abyss Норвегия	CGGVeritas Trilobit Франция	Geospace Technologies OBX США	ГЕОНОД
Внешний вид							
Тип прибора	Развертывание свободное падение	Соединяется с помощью фала	Развертывание с помощью роботов	Развертывание с помощью роботов	Развертывание с помощью роботов	Соединяется с помощью фала	Развертывание свободное падение
Допустимые глубины работ, м	0...500 м	0...700 м	0...3000 м	0...3000 м	0...3000 м	0...3450 м	0...7000 м
Снаряженная масса одного прибора, кг	32,5	30	97	150	59	15,9	23
Автономное время работы, дни	30	15	60	60	75	30	90
Требование к судну	Любое	Требуется адаптации	Требуется адаптации	Специальное	Специальное	Специальное	Любое
Передача прибора лаборатории судна	После каждого развертывания или восстановления	После каждого развертывания или восстановления	После каждого развертывания или восстановления	После каждого развертывания или восстановления	После каждого развертывания или восстановления	После каждого развертывания или восстановления	Свободный режим
Скачивание данных	Проводное	Проводное	Проводное	Проводное	Проводное	Проводное	Беспроводное
Качество сейсмических данных	Полный азимут, 4 компонента	Полный азимут, 4 компонента	Полный азимут, 4 компонента	Узкий азимут, один компонент	Узкий азимут, один компонент	Узкий азимут, один компонент	Полный азимут, 4 компонента
Производительность в сутки, км ²	5	2	1,2	1,2	1,2	2	10

Рис 2. Сравнение технологий сейсморазведки на шельфе

Fig. 2. Comparison of technologies of seismic prospecting on shelf

третью сторону обложки) видно, какие крупногабаритные установки, включая лебедки, приходится размещать на морских судах при использовании фалов.

Некоторые особенности технологии ГЕОНОД

Возможность отказаться от применения фалов предоставляет уникальная разработка, которая внедрена и используется в технологии ГЕОНОД. Схематически конструкция станции ГЕОНОД показана на рис. 4 (см. третью сторону обложки).

Станция снабжена грузом-якорем, который изготовлен из спрессованного морского песка, т. е. из экологически чистого материала. Меха-

низм, соединяющий станцию с грузом-якорем, представляет собой механическое реле, которое размыкается при получении акустического сигнала определенной частоты. При сбрасывании станции в воду груз-якорь погружает ее на дно и удерживает в нужном месте нужное время. После того как станция собрала необходимые данные, с поверхности посылается специальный акустический сигнал с частотой, на которую настроен механизм размыкания соединения станции с грузом-якорем. Происходит размыкание, станция всплывает, а груз-якорь остается на дне и в течение короткого времени (обычно это 15...20 дней) бесследно растворяется. Механизм размыкания каждой отдельной станции настроен на свою собственную частоту размыкания, что позволяет

давать станциям команды на всплытие поочередно для более удобного их сбора на поверхности.

Для сбора всплывших станций с поверхности воды сконструирован снабженный необходимой автоматикой беспилотный катер, показанный на рис. 5 (см. третью сторону обложки).

В верхней части каждой станции ГЕОНОД установлен радиомаячок, который автоматически включается после всплытия станции. Радар катера по сигналу радиомаячка обнаруживает всплывшую станцию, подходит к ней по радиосигналу и с помощью специального сачка поднимает станцию из воды на свою палубу. После этого радар катера разыскивает другую станцию по ее радиосигналу и подбирает ее с воды. Так продолжается до тех пор пока палуба катера не будет заполнена поднятыми станциями и не возникнет необходимость переправить станции на другое судно или пока радар катера не перестанет обнаруживать всплывшие станции, т. е. пока не будут собраны все станции. Кроме того, определение местоположения станций осуществляется с помощью спутниковой системы ГЛОНАСС, если необходима корректировка направления движения к станции беспилотного катера.

Вопросы автоматизации и управления

Перед группой разработчиков технологии ГЕОНОД стоит еще серия задач по механике, автоматизации и управлению. Некоторые из этих задач связаны с управлением ориентацией станции и расположением ее в пространстве посредством использования не одного, а двух или трех грузов-якорей с возможностью разъединения их со станцией независимо друг от друга, что позволит менять ориентацию станции как во время ее нахождения на дне, так и во время движения в воде при погружении и подъеме. Кроме того, на ориентацию станции в пространстве можно влиять, меняя расположение груза-якоря относительно станции. Эти же методы могут использоваться для обеспечения точности установки станции в заданную точку на дне. Возникает необходимость исследования и обеспечения устойчивости динамики механических систем, для чего в большинстве случаев применяется известный метод инноваций [17]. Необходимо также ре-

шать задачи автоматизации и управления при сборе всплывших станций с поверхности воды и доставке их на судно, что осуществляется катером-беспилотником. Сюда входят задачи автоматического наведения катера на станцию, подъем станции на катер с помощью сачка, определение необходимости прекращения сбора станций с поверхности воды в случае полного заполнения палубы катера или в случае, когда собраны все станции с поверхности воды, и транспортировка собранных станций на большое судно. В процессе дальнейшей разработки и совершенствования технологии ГЕОНОД, ее использования в реальных условиях на морском шельфе возникают все новые задачи автоматизации и управления.

Здесь даны лишь краткие описания задач механики, автоматизации и управления, связанных с развитием и использованием технологии ГЕОНОД. Решения этих задач не приводятся, так как по большей части окончательные решения пока отсутствуют да и многие задачи еще требуют более четкой постановки. Несомненно, что в ближайшее время появится ряд новых задач, решение которых будет необходимо для дальнейшей разработки технологии ГЕОНОД. Многолетний опыт научно-исследовательской работы автора настоящей статьи убеждает в том, что публикация гипотез и нерешенных задач часто приводит к проявлению интереса все новых и новых исследователей, а в результате — к решению рассматриваемых проблем. Верится, что Вы, уважаемый читатель, проявите интерес к описанным здесь проблемам и, возможно, окажете позитивное влияние на их решение и на дальнейшее развитие разработок в технологии ГЕОНОД, что имеет исключительно важное значение как для науки и техники, так и для народного хозяйства.

Заключение

Разработанная в течение нескольких последних лет российская технология ГЕОНОД сейсморазведки углеводородов на морском шельфе в целом по всем показателям превосходит используемые в мире технологии. Развитие и совершенствование технологии ГЕОНОД продолжается, но уже сейчас она может и должна применяться и там, где работы ведутся на основе других технологий, и там,

где другие технологии не могут быть использованы. Например, ни одна из других технологий сейсморазведки углеводородов на морском шельфе не работает на малых глубинах и в приливно/отливных транзитных зонах, так как туда не могут подойти крупные морские суда с установленными на них лебедками для фалов, а также технологии, использующие фалы, не могут использоваться на больших глубинах, так как применение фалов длиной в несколько километров не представляется возможным. Диапазон глубин, на которых технология ГЕОНОД работает эффективно и дает достоверную информацию, составляет от 0 до 7000 м. Еще одна немаловажная деталь: стоимость производства станций ГЕОНОД и ряд других затрат при использовании этой технологии как минимум в два раза меньше, чем аналогичные затраты в других технологиях.

В заключение укажем некоторые работы, проведенные с использованием технологии ГЕОНОД.

2011 г. Создание первой версии действующей станции ГЕОНОД. Испытания станций с участием приглашенных экспертов, Черное море, район г. Геленджик.

2011 г. Проведение первой съемки 2D в транзитной зоне акватории Хайпудырской губы, юго-восток Печерского моря, заказ ПАО ЛУКОЙЛ, Россия.

2012 г. Выполнение работ в глубоководном сейсмическом 2D-проекте на глубинах 0,2...2,5 км, акватория Лаккадивского моря (Индия), заказ ONGC Limited, Индия.

2014 г. Исследование сейсмической опасности в зоне строительства Керченского моста, заказ Института Физики Земли РАН и ОАО ГипроТрансМост.

2014 г. Создание и испытания широкополосной донной сейсмической станции реального времени, заказ Института Океанологии им. П. П. Ширшова РАН по гранту Минпромторга России.

2015 г. Осуществление глубоководного 2D-проекта в Индии, глубина 4,5 км, заказ Национального Центра Исследования Арктики и Антарктики, Индия.

2016 г. Пассивные наблюдения на шельфе Сахалина для прямых поисков углеводородов, три профиля по 7,8 км, заказ ООО РН Шельф-Арктика, Россия.

2017 г. Глубоководный 2D-проект 700 км через Андаманские острова (Индия), глубины от

200 м до 4,3 км, 63 постановки станций, заказ Национального Геофизического Исследовательского Института, Индия.

Список литературы

1. Ильинский Д. А., Либерзон М. Р., Шаренков С. Б. Комплексный подход к проведению сейсморазведки на шельфе моря при помощи автономных самовсплывающих донных станций // Сборник статей "Булатовские чтения". Краснодар: Изд-во Института нефти, газа и энергетики ФГБОУ ВО "КубГТУ", 2017. С. 57—65.
2. Либерзон М. Р., Ильинский Д. А., Погородний П. Г., Шаренков С. Б. Мониторинг акваторий в удаленных районах на основе технологии ГЕОНОД // IX Международный аэрокосмический конгресс. Пленарные и избранные доклады. М.: Издательство РИА, 2018. С. 215—220.
3. Либерзон М. Р., Ильинский Д. А., Погородний П. Г., Шаренков С. Б. Проблемы прикладной механики при применении технологии ГЕОНОД сейсморазведки на шельфе // 1-я Международная конференция "Проблемы механики и управления". Тезисы докладов. Махачкала, 2018.
4. Либерзон М. Р., Ильинский Д. А., Погородний П. Г., Шаренков С. Б. Технология ГЕОНОД для сейсморазведки углеводородов на шельфе и обнаружения объектов // Идеи и новации. 2018. Т. 6, № 3. С. 75—81.
5. Slejko D., Santulin M., Garcia J., Papoulia J., Daskalaki E., Fasulaka C., Fokaefs A., Hinski D., Mascle J., Makris J., Nicolich R., Papadopoulos G. A., Tsambas A., Wardell N. Preliminary Seismic Hazard Assessments for the Area of Pylos and Surrounding Region (SW Peloponnese) // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2010. Vol. 51, N. 2—3.
6. URL: <http://fairfieldgeo.com/media/pdfs/Z100-spec-sheet-2018.pdf>
7. URL: <http://fairfieldgeo.com/media/pdfs/ZLoF-spec-sheet-2018.pdf>
8. URL: https://www.inapril.com/wp-content/uploads/2019/06/2019-06-A3000C_Spec-Sheet-approved.pdf
9. URL: <https://www.inapril.com/the-node/>
10. URL: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Manta-Spec-Sheet-2018-September-US-Letter-Email-Quality.pdf>
11. URL: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Trilobit%20Spec%20Sheet%202014%20US%20LoRez.pdf>
12. URL: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Case%20Abyss%20Spec%20Sheet%202014%20US%20LoRez.pdf>
13. URL: https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2019/05/592-12350-02_B_Brochure-OBX-60-Deep.pdf
14. URL: https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/04/592-13010-02_A_Brochure-OBX-90-4p.pdf
15. URL: https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2017/12/592-10720-02_A_Brochure-OBX-150-1.pdf
16. URL: https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/10/592-15670-01_A_Brochure-OBX-750E-4p-for-desktop-printing.pdf
17. Jury E. I. *Inners and Stability of Dynamic Systems* (Second Edition). Robert E. Krieger Publishing Co., Inc. Malabar, Florida, USA, 1982.

Technology GEONOD: Status and Prospects of Automation and Control

M. R. Liberzon, mark@fund.ru,
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Corresponding author: **Liberzon Mark R.**, D. Sc., Professor,
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation,
e-mail: mark@fund.ru

Accepted on August 15, 2019

Abstract

Seismic prospecting is one of the crucial components for an effective use of oil and gas fields on offshore. Since the costs of drilling a well on the shelf is hundreds of times more expensive than drilling a well on land, preliminary marine seismic exploration can help avoid unnecessary costs. High quality data of marine seismic surveys can only be obtained from bottom technologies: special bottom stations are lowered into the investigated area of the seabed. These bottom stations collecting direct and reflected acoustic signals (generated on the surface by an acoustic radiator) from the seabed. After all data is recorded, bottom stations are lifted to the surface, the recorded data is downloaded for subsequent interpretation. As a result, based on the obtained data, a 2D or 3D detailed map of the potential oil and gas deposits is compiled. The resulting maps are used to determine the exact coordinates of the installation of drilling stations. The most common technology of marine seismic exploration is the use of bottom stations on a halyard rope. First development of this technology began in the 1970s and did not assume the means of automation work with bottom stations. All operations of removal and attachment of rope to station, diving and lifting stations, as well as a number of other operations were performed manually. Nowadays, there has not been any automation in working with stations on the halyard rope. In addition, the use of halyard rope has a number of disadvantages such as: Hooking of halyard rope for obstacles on the sea bottom; The breakage of the halyard rope; The need to have additional space on the vessel to store the halyard rope and all accessories, which leads to the use of larger vessels that can not operate at shallow depths; The halyard rope that is connected to the bottom stations generates a seismic noise, which degrades the quality of the received data; Impossible to conduct seismic prospecting in places with high shipping traffic. Developed over the past few years, a new Russian technology of marine seismic exploration GEONOD allows us easily solve many of mentioned problems. Many of these problems do not rise at all, since the GEONODE technology does not use halyards, and the work is carried out by the autonomous self-popup bottom stations (ASDS). In this paper a number of problems on applied mechanics and control in connection with technology GEONOD are considering.

Keywords: technology of seismic prospecting, hydrocarbons, sea shelf, autonomous self-popup bottom stations

For citation:

Liberzon M. R. Technology GEONOD: Status and Prospects of Automation and Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 11, pp. 696–701.

DOI: 10.17587/mau.20.696-701

References

1. Ilyinsky D. A., Liberzon M. R., Sharenkov S. B. Complex approach to the seismic prospecting at the sea shelf with use of autonomous self-popup bottom stations, *Proceedings of the Conference "Bulatov's readings"*, Krasnodar, 2017 (in Russian).
2. Liberzon M. R., Ilyinsky D. A., Pogorodny P. G., Sharenkov S. B. Monitoring of water area in remote areas on the GEONOD technology basis, *Proceedings of the Ninth International Aerospace Congress*, 2018, Moscow (in Russian).
3. Liberzon M. R., Ilyinsky D. A., Pogorodny P. G., Sharenkov S. B. Problems of applied mechanics in use of technology GEONOD for the seismic prospecting of the sea shelf, *Proceedings of the First Intl. Conference "Problems of Mechanics and Control"*, 2018, Makhachkala (in Russian).
4. Liberzon M. R., Ilyinsky D. A., Pogorodny P. G., Sharenkov S. B. GEONOD Technology for Off-shore Seismic Hydrocarbon Exploration and Object Detection, *Ideas and innovations*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 75–81 (in Russian).
5. Slejko D., Santulin M., Garcia J., Papoulia J., Daskalaki E., Fasulaka C., Fokaefs A., Ilinski D., Mascle J., Makris J., Nicolich R., Papadopoulos G. A., Tsambas A., Wardell N. Preliminary Seismic Hazard Assessments for the Area of Pylos and Surrounding Region (SW Peloponnese), *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 2010, vol. 51, no. 2–3 (in Russian).
6. Available at: <http://fairfieldgeo.com/media/pdfs/Z100-spec-sheet-2018.pdf>
7. Available at: <http://fairfieldgeo.com/media/pdfs/ZLoF-spec-sheet-2018.pdf>
8. Available at: https://www.inapril.com/wp-content/uploads/2019/06/2019-06-A3000C_Spec-Sheet-approved.pdf
9. Available at: <https://www.inapril.com/the-node/>
10. Available at: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Manta-Spec-Sheet-2018-September-US-Letter-EmailQuality.pdf>
11. Available at: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Trilobit%20Spec%20Sheet%202014%20US%20LoRez.pdf>
12. Available at: <https://www.seabed-geo.com/sites/default/files/downloads/Case%20Abyss%20Spec%20Sheet%202014%20US%20LoRez.pdf>
13. Available at: https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2019/05/592-12350-02_B_Brochure-OBX-60-Deep.pdf
14. Available at: https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/04/592-13010-02_A_Brochure-OBX-90-4p.pdf
15. Available at: https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2017/12/592-10720-02_A_Brochure-OBX-150-1.pdf
16. Available at: https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2018/10/592-15670-01_A_Brochure-OBX-750E-4p-for-desktop-printing.pdf
17. Jury E. I. *Inners and Stability of Dynamic Systems* (Second Edition). Robert E. Krieger Publishing Co., Inc. Malabar, Florida, USA, 1982.