

Удк 551.46.077:629.584

ПОИСК АВАРИЙНО ЗАТОПЛЕННОГО РАДИОИЗОТОПНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА ПО ТЕПЛОВОМУ ПОЛЮ В ПРИДОННОМ СЛОЕ МОРСКОЙ ВОДЫ

**А.А. Максимов, Д.В. Гичев,
В.Л. Высоцкий, А.С. Филиппов,
А.А. Тагильцев, М.Ю. Черанев,
Р.А. Гончаров**

ООО «ДВ Нуклид»¹
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН²
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН³

Изложены вопросы подготовки и проведения комплексной экспедиции по поиску аварийно затопленного радиоизотопного термоэлектродгенератора (РИТЭГ) у мыса Низкий о-ва Сахалин в Охотском море. В лаборатории прикладной механики сплошных сред ИБРАЭ РАН выполнено теоретическое обоснование, а на гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН – натурный эксперимент, подтверждающий применимость метода поиска РИТЭГ по его тепловому следу. В экспедиции для поиска РИТЭГ использовались разработанные в ТОИ ДВО РАН термоградиентометр и термогирлянда, а также оборудование, включающее морской буксируемый магнитометр, СТ-профилограф, подводную видеокамеру и погружной гамма-радиометр. В экспедиции на акватории 75 км² получены оценки стратификации температуры морской воды в узлах топографической сетки с шагом 500±50 м, выделены инверсные слои в придонном слое морской воды до 2–3 м над грунтом, выполнена классификация их на принадлежность к техногенному тепловому источнику, находящемуся на дне. Обнаружен участок, на котором устойчивая инверсия температуры в придонном слое проявлялась одновременно с реакцией магнитометра и который ввиду вероятности присутствия затопленного искомого объекта требует дообследования.

ВВЕДЕНИЕ

История поиска радиоизотопного термоэлектрического генератора (РИТЭГ), аварийно затопленного 20.09.1987 г. (сброшен с внешней подвески вертолета при возникновении предаварийной ситуации) в районе м. Низкий на восточном побережье о-ва Сахалин, насчитывает несколько специальных морских экспедиций, которые периодически проводились с 1987 по 2014 г. В поисковых работах принимали участие: Гидрографическая служба ТОФ, Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Федеральное государственное учреждение «Аварийно-спасательная служба по проведению подводных работ специального назначения», Даль-

невосточный государственный технический университет, лаборатория радиационного контроля ООО «ДВ-Нуклид», специалисты Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН. В состав экспедиции 2010 г. входили водолазы и спасатели, для поиска использовался автономный обитаемый подводный аппарат (АНПА) «Клавесин» [1].

Несмотря на предпринятые усилия, а также опыт успешного поиска и подъема аналогичного объекта в прибрежной полосе на севере о-ва Сахалин [2], до настоящего времени РИТЭГ в районе м. Низкий не обнаружен. Это является следствием крайне сложных гидрологических условий района, неопределенности

координат точки сброса, а также малозаметности самого объекта поиска ввиду его небольших габаритов (1,8×1,3×1,7 м, включая транспортную стальную раму, масса около 2,5 тонн) и малой контрастности создаваемых им радиационно-физических полей на уровне природного фона.

Конструкция РИТЭГ включает закрытый источник тепла, созданный на основе ⁹⁰Sr, активность его на 2014 г. соответствует 8,9 ПБк, тепловая мощность – 1100 Вт. Несмотря на отсутствие до настоя-

¹ 690018, Владивосток, ул. Вострцова, 2, кв. 22. Тел.: (423)234-55-63. E-mail: maxdv_hyk@list.ru.

² 115191, г. Москва, Большая Тульская ул., д. 52. Тел.: (495)955-2261. E-mail: vvl@ibrae.

³ 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: (495) 231-30-83. E-mail: poi61@poi.dvo.ru.

щего времени радиоактивного загрязнения воды, грунта, фауны и флоры радионуклидом ^{90}Sr , определение места нахождения и подъем РИТЭГ, а также мониторинг экологического состояния района его вероятного падения остаются актуальными задачами, требующими своего разрешения. До настоящего времени район закрыт для рыболовства и других видов деятельности в связи с тем, что объект является потенциальным источником радиоактивного загрязнения окружающей среды.

■ Условия поиска

Район поиска удален от защищенных бухт, имеет линейные размеры $6(8) \times 12$ км и включает прибрежную акваторию восточнее м. Низкий, открытую воздействию ветров и океанской зыби. Эрозия берегов, рыхлость берегового грунта, речной сток и течения приводят к ухудшению видимости в придонном слое с 5–6 до 0,2–0,5 м. Происходит постоянное перемещение песчаных донных отложений, что способствует быстрому заиливанию любых затопленных малоразмерных объектов (в 1998 г. специальный эксперимент с макетом РИТЭГ показал, что он заилился в течение 1 месяца [1]). Глубины у берега составляют 1–1,5 м, на внешней границе района – 50–70 м. Ввиду этого поисковые работы могут проводиться у берега только с малоразмерных плавсредств, а на удалении – с борта судна обеспечения или использованием подводных аппаратов. Одной из основных задач поисковых работ является надежная идентификация выявленных неоднородностей физических полей при невозможности визуального наблюдения объекта. Так, в экспедиции 2010 г. буксируемым магнитометром было получено большое

количество (несколько сотен) позиций потенциальных контактов, что потребовало для их анализа привлечения данных, полученных другими, независимыми методами [1]. При подготовке экспедиции 2014 г. было принято решение использовать методы и технические средства, позволяющие регистрировать не принимавшееся ранее во внимание тепловое поле в придонном слое морской воды. Решение обусловлено тем, что до настоящего времени РИТЭГ способен оказывать активное тепловое воздействие на морскую среду (воду, грунт, растительность), что подтверждено результатами обследования найденного у м. Мария и поднятого на поверхность в 2007 г. аналогичного РИТЭГ [2].

■ Обоснование применимости метода поиска. Моделирование

Для получения представлений о пространственно-временных параметрах и динамике ожидаемого теплового поля вблизи РИТЭГ в придонном слое морской воды в лаборатории прикладной механики сплошных сред ИБРАЭ РАН решалась задача, связанная с образованием и формированием теплового следа, образующегося от постоянно подогревающего ее источника, расположенного на дне моря. Для этого использовались методы вычислительной гидродинамики (CFD – Computational fluid dynamics), воплощенные в коммерческом CFD-коде ANSYS FLUENT.

Основными условиями для моделирования являлись: источник имеет постоянную тепловую мощность 1000 Вт, поперечное сечение 1 м^2 , полностью заилен, кроме одной теплоизлучающей поверхности, находящейся на уровне грунта, температура воды по глубине соответствует устой-

чивой стратификации, придонное течение стационарное с линейно спадающим по высоте от 4 м до грунта профилем со скоростью от 0,2 до 0,01 м/с.

Определены пространственно-временные характеристики теплового следа для двух условий: первое – РИТЭГ при ударе о воду не разрушился, температура поверхности составляет $10 \text{ }^\circ\text{C}$; второе – при ударе о воду разрушены радиаторы охлаждения, температура поверхности возросла до $50 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1, 2).

Из расчетов следует, что в зоне непосредственно над неразрушенным заиленным РИТЭГ на высоте 1–10 см от грунта можно ожидать перепад температур до $0,5\text{--}1 \text{ }^\circ\text{C}$, а на высоте 0,5–0,7 м радиусом 0,5–1,0 м от него – до $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Применительно к разрушенному РИТЭГ (без теплоотводящей оболочки) приведенные выше параметры становятся больше: на высоте 1–10 см от грунта можно ожидать перепад температур до $2\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}$, на высоте 1–2 м радиусом 1–2 м от него – до $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Увеличение температуры излучающей поверхности источни-

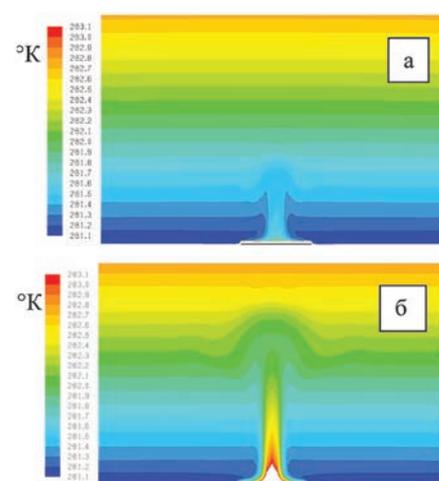


Рис. 1. Нарушение стратифицированного теплового поля ($^\circ\text{K}$ – градус Кельвина) морской воды: а – температура излучающей поверхности источника $10 \text{ }^\circ\text{C}$, высота теплового факела 0,5–0,7 м; б – температура поверхности $50 \text{ }^\circ\text{C}$, высота теплового факела 1–2 м

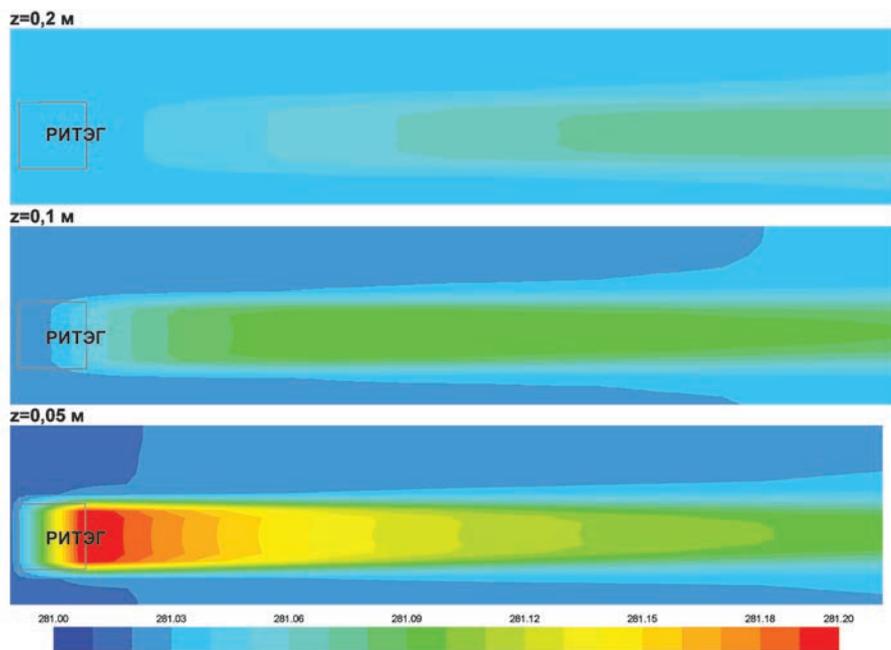


Рис. 2. Температурный след, образующийся в морской воде над заиленным до уровня грунта РИТЭГ, на высоте 0,05–0,2 м при скорости течения 0,2 м/с (поток ламинарный)

ка до 50 °С в покоящейся среде незначительно увеличивает размеры тепловой аномалии, но повышает в 2–3 раза ее высоту и перепад температуры на внешней границе. При наличии течения поток у дна смещает теплую воду, аномалия над источником уменьшает свои размеры. Соответственно образуется тепловой след либо квазисплошной структуры (при приближении к ламинарному типу потока), либо в виде различных размеров тепловых линз (аномалий), движущихся по направлению генерального течения с частичным подъемом над грунтом (в турбулентном потоке).

Из расчетов следует, что поиск затопленного теплового источника по температурным возмущениям возможен при измерении температуры в придонном слое в непосредственной близости у дна в диапазоне от единиц до нескольких десятых-сотых долей градуса в ограниченном пространстве, локализованном в придонном слое морской воды.

■ Экспериментальная проверка

На морской экспедиционной станции ТОИ ДВО РАН в б. Витязь (Японское море) в натуральных условиях был проведен ряд экспериментов по регистрации изменения температурного поля морской воды в придонном слое от техногенного источника тепла [3]. Установлено, что тепловой источник, в качестве которого использовался предварительно разогретый на воздухе до ~ 130 °С чугунный груз диаметром 0,4 м, после погружения его на дно вплоть до полного своего охлаждения изменял исходную (фоновую) структуру температурного разреза, создавая на высоте до 0,5 м от дна инверсный слой с перепадом температуры от 0,6 до 0,15 °С. Этот эффект, а также образование в придонном слое над источником полусферической области повышенной на 0,1 °С теплой воды диаметром ~ 0,8 м, что в 2 раза больше размера самого источника, были устойчиво зафиксированы ST-профилографом «Sea-Bird» SBE37-SI MicroCAT

и термоградиентометром (2TD-профилографом) (рис. 3).

Экспериментально установлено, что тепловыделение от малогабаритного объекта диаметром 0,4 м, находящегося на дне, имеет нестационарный характер и может быть обнаружено в придонном слое морской воды существующими средствами измерения температуры, которые и были в дальнейшем применены при поиске РИТЭГ в Охотском море (табл. 1, рис. 4).

Назначение измерительных средств:

1. ST-профилограф «Sea-Bird» SBE37-SI MicroCAT – определение профилей температуры и солёности морской воды. Температурный датчик содержит компактный малоинерционный термистор с высокостабильным электронным интерфейсом (Wien-bridge-oscillator). В датчике электропроводности чувствительным элементом является ячейка измерения сопротивления.

2. Термоградиентометр (2TD-профилограф) разработки ТОИ ДВО РАН – определение вертикального и горизонтального профилей температуры морской воды способом зондирования и буксировки. Прибор специально изготовлен для использования в поисковых работах, оснащен

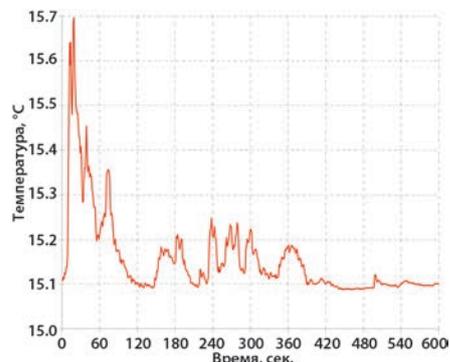


Рис. 3. Динамика изменения температуры морской воды на высоте 0,5 м от точечного источника тепла, расположенного на дне залива, по мере его охлаждения при начальной температуре на воздухе 130 °С

Таблица 1. Сводные характеристики использовавшихся измерительных средств при поиске РИТЭГ у мыса Низкий в Охотском море по температурному и магнитному полям

Параметр	«Sea-Bird» SBE37-SI	Термоградиентометр (2TD-профилограф)	Термогирлянда ТГА-22Д	Магнитометр SDM-4000
Температура:				
- диапазон	-5 °C ÷ +35 °C	-5 °C ÷ +35 °C	-5 °C ÷ +35 °C	-
- точность	0,002 °C	0,01 °C	0,1 °C	-
- цена разряда	0,0001 °C	0,002 °C	0,0625 °C	-
Давление:				
- диапазон	-	0 ÷ 100 кПа	0 ÷ 100 кПа	-
- точность	-	0,1 кПа	0,1 кПа	-
- цена разряда	-	0,02 кПа	0,02 кПа	-
Электропроводность:				
- диапазон	0 ÷ 7 См/м	-	-	-
- точность	0,0003 См/м	-	-	-
-цена разряда	0,00001 См/м	-	-	-
Магнитная индукция:				
- диапазон	-	-	-	+/- 1 Гаусс
- точность	-	-	-	6,7 нТл
Частота опроса	2 Гц	1 Гц	3 кадра в мин	10 Гц

двумя высокочувствительными малоинерционными датчиками температуры и датчиком глубины, может измерять температуру воды, а также работать в режиме термоградиентометра, что способствует снижению уровня помех и повышению чувствительности. Датчики: 2 датчика температуры

типа PT100, RES2k и термокомпенсированный датчик давления (глубины) Д-0,6.

3. Автономная термогирлянда ТГА-22Д разработки ТОИ ДВО РАН [4] – оперативное и долговременное измерение вертикального и горизонтального профилей температуры воды. Выполнена на базе

грузонесущего кабеля, включает 22 цифровых датчика температуры DS18B20 (DallasSemiconductor) и один – давления. Имеет автономные блок электропитания, управления, записи и передачи (скачивания при подключении интерфейса) данных, которые размещены в герметичном корпусе (включает микроконтроллер и энергонезависимую память).

4. Морской магнитометр SDM-4000 SharkMarine – обнаружение магнитных неоднородностей (аномалий) в морской воде в стационарных условиях и в режиме буксировки. Датчик основан на магниторезистивном эффекте и выполнен на резисторной сборке (три взаимно перпендикулярных магниторезистора) фирмы «Honeywell».

5. Подводная цветная видеокамера. Разрешение 1024×768, 24 кадра/с, длина кабеля 50 м.

6. Полевой гамма-радиометр СРП-68-02 с погружным (до 25 м) сцинтилляционным детектором предназначен для измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения и оценки радиационной обстановки на воздухе, в морской воде и на дне моря.

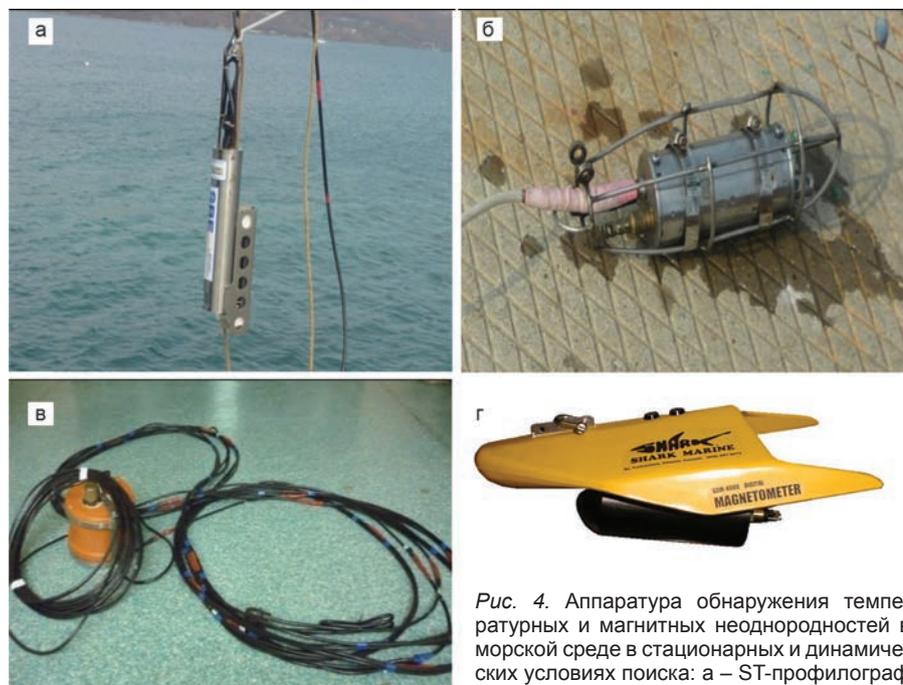


Рис. 4. Аппаратура обнаружения температурных и магнитных неоднородностей в морской среде в стационарных и динамических условиях поиска: а – ST-профилограф «Sea-Bird» SBE37-SI MicroCAT, б – термогирлянда ТГА-22Д, в – автономная термогирлянда ТГА-22Д, г – морской магнитометр SDM-4000 SharkMarine

градиентометр (2TD-профилограф), в – автономная термогирлянда ТГА-22Д, г – морской магнитометр SDM-4000 SharkMarine

■ Организация и выполнение поисковых работ

Экспедиция проведена в период 10–30.09.2014 г. на МБС «Калининградец» Дальневосточного филиала МЧС г. Находки (рис. 5), в прибрежном районе постановка и буксировка поискового оборудования осуществлялись малоразмерным плавсредством (рис. 6).

Программа поисковых работ предусматривала:

- определение стратификации температуры морской воды по вертикали на контрольных станциях в районе поиска по сетке 500 ± 50 м;
- формирование карт придонных полей температуры на горизонтах 0,5/1,0/1,5/2,0 м от грунта и градиентов температуры между ними (0,5–1,0/1,0–1,5/1,5–2,0);
- выделение областей повышенных вариаций полей температуры и градиентов в районе поиска в интересах формирования критериев

обнаружения температурных аномалий от теплового источника, расположенного на дне (РИТЭГ и пр.);

- выделение инверсных температурных слоев морской воды (температурных аномалий) в придонном слое до 2–3 м от дна и сопоставление их координат с данными магнитометрических измерений, полученных в экспедиции 2010 г., с целью дообследования последних на предмет присутствия на дне объектов, соответствующих РИТЭГ, а также для самостоятельного поиска во всем обследуемом районе;

- разработка критериев обнаружения РИТЭГ в реальных условиях с использованием аппаратуры измерения температуры, магнитного и радиационных полей;

- при обнаружении источника, отвечающего критериям обнаружения РИТЭГ, предусматривался

его визуальный допрос, осмотр водолазами и проверка на соответствие радиоактивному источнику;

- оценка радиационной обстановки вокруг обнаруженного объекта, фиксация его места нахождения и передача координат для последующего подъема;

- для привязки обнаруженной температурой неоднородности к месту нахождения источника предусматривалось использовать термогирлянду ТГА-22Д, располагая ее горизонтально на дне.

В интересах оценки радиационной обстановки в районе поиска периодически проводили контрольные радиометрические наблюдения гамма-радиометром СРП-68-02. С борта МБС «Калининградец» и малоразмерных плавсредств в прибрежной полосе и открытой части района измеряли МЭД, которая в зависимости от расстояния до берега изменялась в пределах 0,04–0,06 мкЗв/ч, в морской воде – от 0,01 до 0,02 мкЗв/ч и на дне в пределах 0,06–0,10 мкЗв/ч, что соответствует природному фону. Радиационная обстановка в районе поисковых работ характеризовалась как «нормальная», радиоактивного загрязнения внешней среды не обнаружено.

■ Картографирование

В соответствии с программой-методикой вся площадь района поиска (район №363) была покрыта сетью гидрологических станций преимущественно с шагом 500 ± 50 м (рис. 7). Выполнено 416 гидрологических станций, включая подрайон допроса температурной инверсии. Работы проводилась в два этапа:

- при благоприятных погодных условиях измерения вели с борта малоразмерного плавсредства в прибрежном районе и в зоне вероятного падения РИТЭГ до глубин 10–12 м;



Рис. 5. МБС «Калининградец» (а) и район поиска (б)

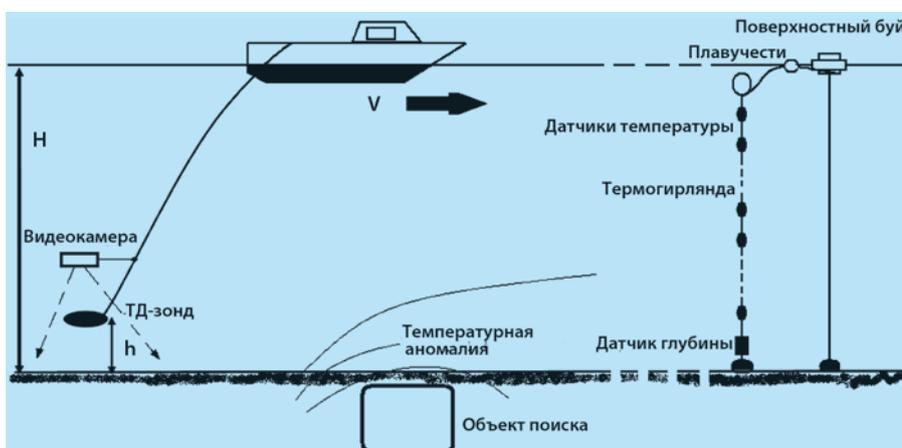


Рис. 6. Схема постановки и буксировки оборудования малоразмерным плавсредством



Рис. 7. Район, подрайоны поиска, расположение гидрологических станций (а), и поле глубин в районе поиска (б)

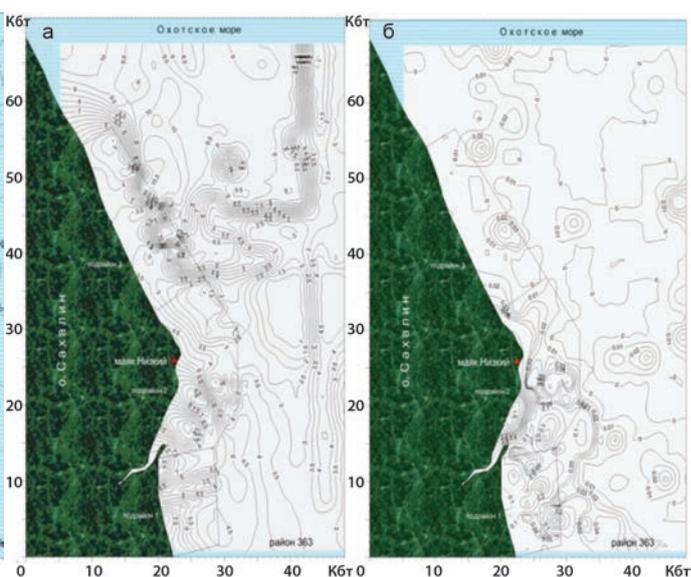


Рис. 8. Поля температуры (а) на горизонте 0,5 м и положительного градиента температуры (б) между слоями 0,5–1,0 м от грунта в районе поиска

- при ухудшении погодных условий (недопустимости спуска на воду малоразмерного плавсредства) измерения вели с борта МБС «Калининградец» на глубинах от 10–12 м до 70 м.

С учетом вероятного места падения и тепловой модели затопленного РИТЭГ в интересах оптимизации поиска основное внимание было уделено исследованию придонного слоя морской воды на 2–3 м от грунта.

Из полученных на гидрологических станциях данных формировали выборки и рассчитывали градиенты температур в слоях 0,5–1,0, 1,0–1,5 и 1,5–2,0 м. В соответствии с руководством по картографированию физических полей, разработанному в ИБРАЭ РАН на основе пакета инженерной графики «Surfer 9.0», в морских условиях строили картограммы глубин, температуры и градиентов температур на каждом запланированном для анализа придонном слое морской воды.

Анализ поля глубин (рис. 7) показал, что рельеф дна имеет неоднородную форму, которая влияет на формирование придонного поля температуры и его гра-

диентную структуру. В частности, перпендикулярно береговой черте располагается небольшая возвышенность, которая изменяет направления придонного течения и соответственно температуру, отделяет участки дна друг от друга, образуя северную и южную независимые гидрологические придонные области. У берега такая же особенность наблюдается в районе устья реки, где глубины варьируют от 0,5–1,0 м до 4–6 м.

Эти особенности заметно проявляют себя на структуре поля температуры и положительного градиента температуры в придонном слое морской воды, вариации которых возрастают по мере приближения к береговой черте. В наибольших количествах они наблюдаются в подрайонах 1, 2 на подходе к маяку Низкий, где предположительно был аварийно сброшен РИТЭГ (рис. 8).

В подрайоне 1 (вероятное место падения РИТЭГ) дополнительно наблюдалась временная неустойчивость состояния общего поля температуры, которая осложняла поиск и была связана с периодическим выходом холодных водных масс с глубоководной части района в мелководную (рис. 9).

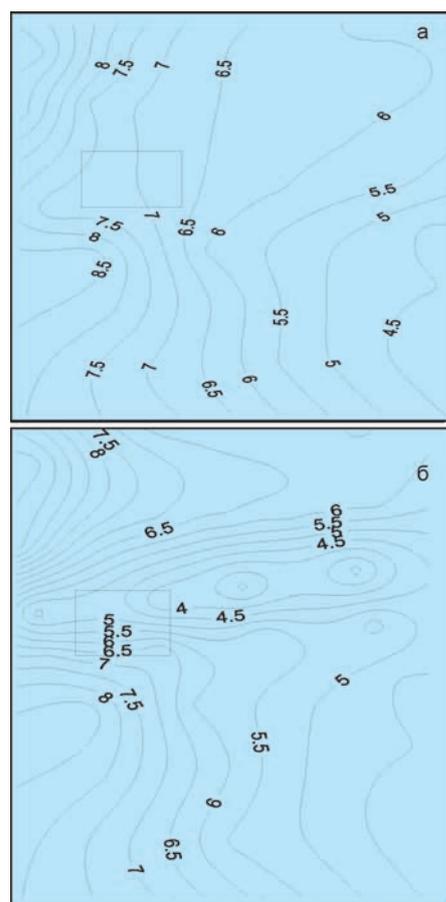


Рис. 9. Изменение структуры поля температуры в подрайоне 1 на 0,5 м от дна в результате выхода холодной водной массы с глубин 14–22 м (наблюдения (а) 12.09 и (б) 15.09. 2014 г., прямоугольником отмечен один потенциальный район доиска РИТЭГ, выделенный по данным магнитометрических наблюдений экспедиции 2010 г.)

В целом по всему району 363 поля температуры в придонном слое морской воды оказались крайне неоднородными и на 0,5–2,0 м от грунта имеют существенно различающуюся между собой структуру. Северная часть района отделена устойчивым температурным фронтом от южной и глубоководной частей и имеет индивидуальные особенности распределения в подрайонах 1 и 2.

Анализ поля положительных градиентов температуры по району показывает, что наибольшие их количество и величины наблюдаются в южной части прибрежной зоны (градиенты составляют доли–единицы градусов), на подходе и частично в районе м. Низкий в подрайонах 1 и 2. В центральной части района поиска существуют протяженные области с нейтральным значением градиентов температуры, которые сохраняют эти показатели по всей толще воды от 0,5 м до 2,0 м над грунтом.

К общей закономерности, присущей акватории всего района, можно отнести возрастание по мере удаления от дна количества природных температурных аномалий и их вариаций (градиентов).

Градиенты с обратными значениями температур ($-0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ – тепловая инверсия в придонном слое) оказались крайне редким явлением (10 обнаружений на 386 гидрологических станциях), что не позволило построить аналогичные картограммы.

■ Критерии и достоверность обнаружения

Одним из критериев, принятых для отнесения температурной неоднородности (аномалии) к признакам присутствия РИТЭГ, было обнаружение устойчивых инверсных слоев морской воды у дна с градиентами до $-0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве примера на рис. 10 приведе-

ны температурные профили на ст. 3 и 5 от 22.09 и 25.09.2014 г., подтверждающие наличие инверсного слоя на уровне десятые–сотые доли $^{\circ}\text{C}$ соответственно.

В результате обобщения и анализа модельных и экспериментальных данных о пространственно-временной изменчивости поля температуры, вызванного воздействием точечного источника тепла, находящегося на дне, полей температуры и их градиентов в придонном слое морской воды, к критериям присутствия РИТЭГ были отнесены следующие условия.

1. Обнаружение инверсных слоев в режиме зондирования преимущественно на горизонтах до 1 м (предельно до 3 м) от дна и малоразмерных температурных аномалий (до 10 м) при буксировке измерительной аппаратуры на этих горизонтах.

2. Данные о наличии тепловой инверсии в придонном слое морской воды с отрицательными градиентами $1\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ у дна ($0,5\text{--}1\text{ м}$) и $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ на высоте до 3 м от грунта исходя из возможности аварийного состояния РИТЭГ.

3. Допускается принимать во внимание наличие автономных

инверсных температурных аномалий (неоднородностей) на горизонтах 2–4 м от грунта только при благоприятных гидрометеорологических условиях из предположения возможности всплытия подогретой РИТЭГ воды и образования температурного следа.

4. Наличие инверсных слоев должно быть устойчивым в пространстве (локализоваться в ограниченной области размерами от единиц–десятков до сотни метров) и во времени, допуская неоднократный выход на источник тепла в целях передачи контакта для доиска и идентификации обнаруженной температурной неоднородности.

В соответствии с принятыми критериями в районе поиска было обнаружено 10 точек с инверсными градиентами температуры в придонном слое морской воды на 1–3 м от грунта:

- одна точка (вблизи ст. 15) оказалась в области вероятного падения РИТЭГ в подрайоне 1 на подходе ($\sim 3700\text{ м}$) к м. Низкий и удалении $\sim 800\text{ м}$ от берега;

- две другие точки расположились в глубоководной части района восточнее ст. 15 на удалении

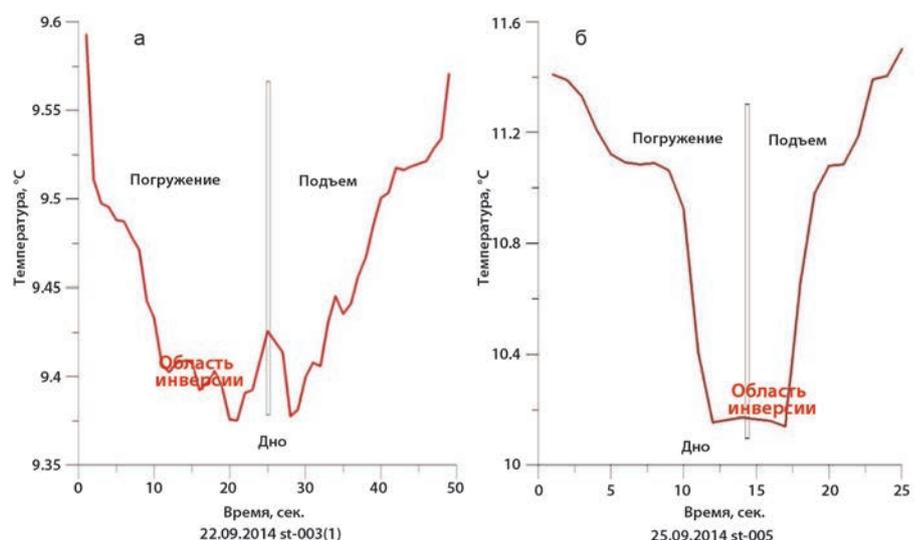


Рис. 10. Обнаружение и подтверждение наличия инверсного слоя температуры у дна методом двойного профилирования (погружение-подъем) на станциях 3 (а) и 5 (б) 22.09. и 25.09.2014 г. соответственно

3300–4200 м и 3700–4600 м от берега и м. Низкий соответственно;

- группа из семи точек оказалась сосредоточенной в северной части района на 4600–7200 м далее за м. Низкий на удалении 1800–2800 м от берега.

В силу ограниченности по времени экспедиции и недостаточного количества дней с благоприятной погодой для работы с малоразмерного судна основное внимание было уделено детальному изучению поля температуры в придонном слое морской воды в районе ст. 15.

Проверка достоверности обнаружения инверсного слоя на ст. 15 была выполнена методом двойного профилирования – сравнивались результаты измерений температуры на этапе погружения температурного зонда и при его подъеме. Кроме этого дополнительно к основному прибору (SBE) был прикреплен на 0,5 м выше него 2TD-зонд, что позволило получать профиль температуры двумя независимыми приборами и контролировать глубину погружения.

Результаты двойного профилирования подтвердили устойчивые показания зонда SBE, наличие инверсного теплового слоя морской воды на глубине ~ 0,6 м от дна и отсутствие его выше этого уровня с помощью 2TD профилографа. Данный способ применялся в дальнейшем и на других гидрологических станциях с целью проверки достоверности обнаружения инверсных слоев морской воды у дна.

Проведенное далее температурное дообследование придонной области морской воды с центром на ст.15 в радиусе 100 м от нее путем дополнительного зондирования в радиальных направлениях от ст.15 выявило семь дополнительных точек (станций) с

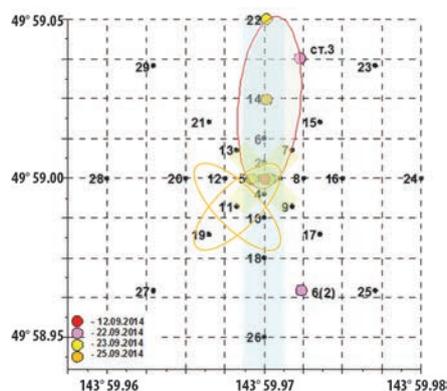


Рис. 11. Расположение тепловых аномалий (инверсных слоев) относительно ст.15 (в центре) по данным наблюдений 12–25.09.2014 г. (размер ячейки 25×25 м), обнаруженных вертикальным зондированием с помощью ST-зонда (желтым цветом отмечена крестообразная зона размещения на дне термогирлянды, голубым – галс № 8 при буксировке магнитометра с термоградиентометром в придонном слое морской воды)

признаками придонной инверсии от 0,1 до 0,1 °С (рис. 11).

Из данных, приведенных на рис. 11, видно, что основное количество аномалий (шесть из семи) локализуется в небольшой линейно протяженной области шириной 20–30 м и длиной до 100 м, что свидетельствует о присутствии в районе нахождения ст. 15 постоянно действующего теплового источника.

С целью подтверждения факта обнаружения теплового источника с центром в районе ст. 15 дополнительно была использована термогирлянда ТГА-22Д, которую укладывали на грунт последовательно в двух взаимно перпендикулярных направлениях:

- с северо-востока на юго-запад, время набора информации 46 минут;
- с юго-востока на северо-запад, время набора информации 15 минут.

Принимая во внимание чувствительность датчиков температуры термогирлянды на уровне 0,1 °С предполагалось зарегистрировать ее изменение на грунте в районе ст. 15 на уровне до 0,4 °С,

что позволило бы уточнить местоположение теплового источника и приступить к его дообследованию. Однако последующий анализ полученных данных с помощью термогирлянды не выявил вариации поля температуры на дне, выходящий за пределы погрешности измерений, т. е. более 0,1 °С (источник тепла не был обнаружен термогирляндой).

Причина могла состоять в том, что в момент установки термогирлянды не было известно точное место расположения температурной аномалии. Позднее обнаруженная при буксировке термоградиентометра тепловая аномалия действительно оказалась смещенной относительно места установки термогирлянды на 5–7 м в северном направлении.

Дальнейшим шагом по уточнению возможного места положения теплового источника и идентификации его на принадлежность к РИТЭГ стало комплексное обследование квадрата акватории 100×100 м, в центре которого располагалась ст. 15 (рис. 12). Оно проводилось равномерными взаимно перпендикулярными галсами через 25 м каждый с применением магнитометра SDM-4000 на планере-заглубителе и расположенных на нем терморградиенто-

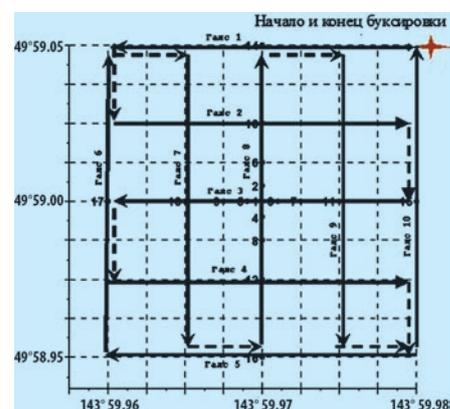


Рис. 12. Схема буксировки магнитометра, термоградиентометра и видеокамеры в квадрате 100×100 м, в центре которого находилась ст. 15 (25.09.2014 г., размер ячейки 25×25 м)

метре (2TD-профилографе) и видеокамеры.

Во время буксировки было обнаружено 12 магнитных и 19 температурных аномалий. Последующая статистическая и корреляционная обработка результатов измерений позволила не принимать во внимание температурные аномалии, связанные с неравномерным перемещением термоградиентометра в горизонтальной плоскости, и отнести их к помехам. Также не рассматривались аномалии температуры, не имеющие синхронного по времени совпадения со срабатыванием

магнитометра (отнесены к естественным вариациям поля температуры на горизонте буксировки аппаратуры).

В результате принятия такого решения только на одном из десяти галсов (галс № 8) была обнаружена температурная аномалия, не связанная с помехами и одновременно подтвержденная магнитометром, которая оказалась смещенной на 5–7 м севернее от ст. 15.

На отметке 53–59 м (рис. 13) датчиком температуры зафиксированы две близко лежащие положительные малоразмерные неоднородности размерами 2–5 м с

превышением температуры над средним уровнем 0,12–0,23 °С. Одновременно было отмечено срабатывание магнитометра, которое полностью совпадает по длительности с изменением градиента температуры, который составил 0,2–0,3 °С (в это время аппаратура перемещалась по горизонту практически равномерно с вариациями глубины в пределах 8±0,05 м).

Одновременно следует обратить внимание на наличие вблизи обсуждаемой предположительно техногенной температурной аномалии двух природных неоднородностей (на отметках 41 и 77 м) с градиентами температуры 0,05–0,1 °С, которые по пространству не совпали с показаниями магнитометра и были отнесены к фоновым природным аномалиям.

Обработка данных и приведение значений градиента температуры термоградиентометра к стационарным условиям движения аппаратуры на горизонте включала построение дисперсной функции вариации глубины и внесение соответствующих поправок в полученные результаты наблюдений при $T_2 > T_1$ (где T_1 – показания датчика температуры №1, T_2 – показания датчика температуры №2). Их величина оценивалась из следующих условий:

$$\Delta T_i = \begin{cases} T_{2i} - T_{1i}, T_{2i} \leq T_{1i} \\ (T_{2i} - T_{1i}) \cdot \frac{Km}{D_i}, T_{2i} > T_{1i} \end{cases}$$

где $D_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i-n/2}^{i+n/2} (H_i - \bar{H})^2$ – выборочная дисперсия ряда значений глубины в режиме «скользящего окна», i – индекс выборки, Km – коэффициент масштабирования, H_i – значение глубины в выборке, \bar{H} – выборочное среднее глубины, n – количество измерений в выборке. Условие $T_2 \leq T_1$ соответствует нормальному распре-

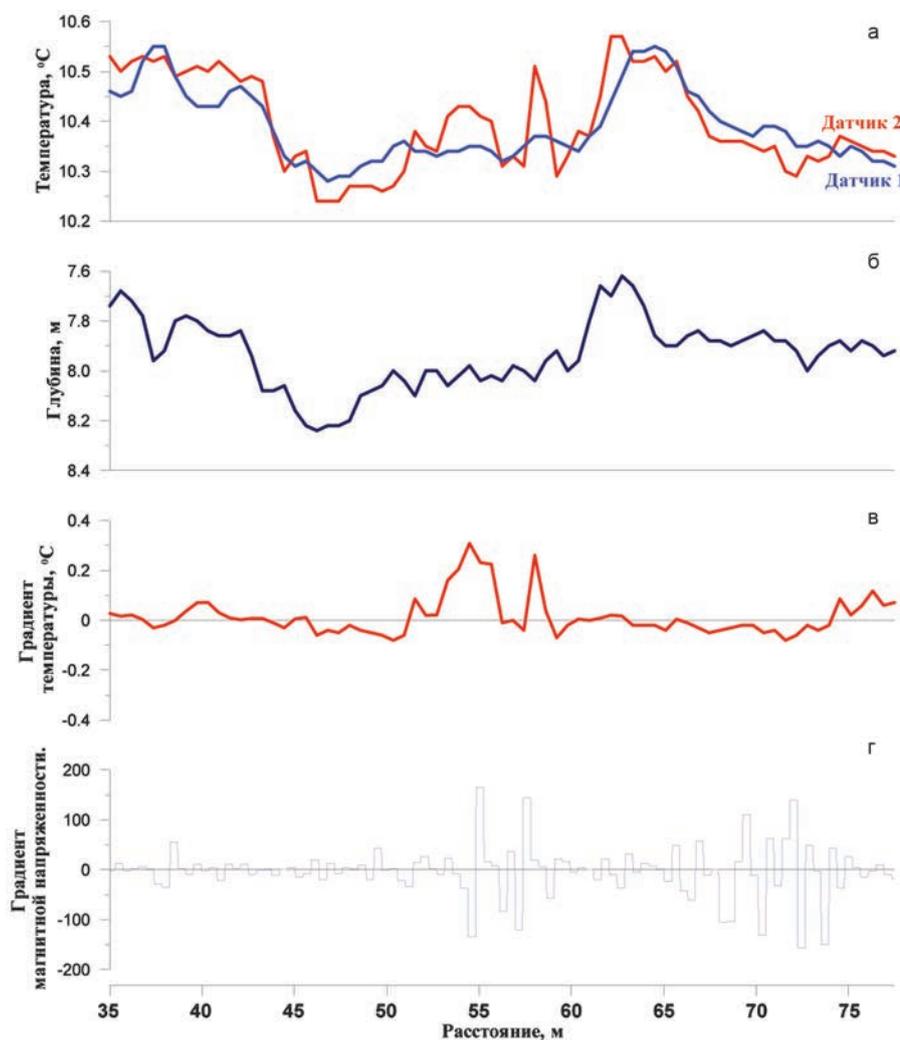


Рис. 13. Фрагмент 8-го галса буксировки магнитометра и термоградиентометра в области предположительного падения РИТЭГ и обнаружения техногенной температурной аномалии в придонном слое морской воды в районе ст. 15 (а – фактические показания температуры двумя независимыми датчиками 2TD-профилографа, где синий – T_1 и красный – T_2 ; б – глубина перемещения измерительной аппаратуры, в – градиент температуры, г – показания магнитометра)

лению температуры и для случая аномалии температуры принимает вид $T_2 > T_1$.

На протяжении всей экспедиции погодные условия не позволяли эффективно использовать подводную видеокамеру, поскольку видимость в придонном слое морской воды на удалении до 1 м от дна не превышала 20 см. По этой же причине визуальный осмотр, произведенный легководолазами экспедиционного гидрографического отряда 56 ГС ТОФ, оказался безрезультативным (обследование наощупь дна радиусом до 5 м от ст. 15 не дало положительных результатов).

По причине неблагоприятных погодных условий и окончания срока проведения экспедиции, определенного программой, поисковая операция 2014 г. была завершена без физического подтверждения обнаружения объекта поиска.

ВЫВОДЫ

1. На основании численного и натурального моделирования, а также результатов натурных исследований поля температуры в придонном слое морской воды в районе

363 выявлены признаки и разработаны критерии обнаружения малогабаритного теплового источника, находящегося на дне моря.

2. Выполнено картографирование района 363 по полю температуры и градиентам температур в придонном слое морской воды с шагом 0,5 м на глубинах от 0,5 до 2,0 м от грунта по всему району поиска по сетке 500×500 м.

3. Выделены 10 гидрологических станций, отвечающих признакам присутствия теплового источника, располагающегося на дне моря, из которых одна станция оказалась расположенной по маршруту пролета вертолета (на ~800 м удалена от берега) и вблизи района скопления магнитных аномалий, обнаруженных экспедицией 2010 г., что послужило основанием для ее детального изучения.

4. Техническими средствами в процессе буксировки поисковой аппаратуры вблизи ст. 15 на 5–7 м севернее от нее синхронно зарегистрированы магнитная и температурная аномалии, по своим параметрам не противоречащие основным признакам присутствия затопленного объекта, что требует ее обследования в будущем.

5. Впервые в реальных условиях с борта МБС «Калининградец» в Охотском море в режимах зондирования, буксировки и многосуточного непрерывного набора информации на буйковых станциях выполнено подробное картографирование поля температуры среды в районе, а также подтверждена практическая возможность применения для поиска малоразмерного теплового источника, расположенного на дне моря, с перепадами температур над ним от 0,01 до 0,1 °С, аппаратуры, разработанной в ТОИ ДВО РАН.

6. Для выполнения поисковых работ в обследуемом и подобных по сложности гидрологических условиях районах необходима разработка более производительного поискового оборудования, включающего немагнитную буксируемую у дна (или телеуправляемую) широкозахватную базу с размещением на ней ряда независимых измерительных средств, синхронно регистрирующих разнородные физические поля: температуру, магнитные и электрические неоднородности, тормозное гамма-излучение.



ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов О.Л., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Наумов Л.А. Опыт широкомасштабного поиска подводного потенциально опасного объекта в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2010. №2(10). С. 36–43.
2. Москалев Н.Г. Подводный поиск утерянной радиоизотопной установки в сложном районе Охотского моря // Морские испытания. 2007. №2. С. 14–27.
3. Тагильцев А.А., Максимов А.А., Гичев Д.В., Высоцкий В.Л., Филиппов А.С., Черанев М.Ю., Гончаров Р.А. Обоснование применимости косвенных методов поиска опасных объектов в море // Девятый Всерос. симпозиум «Физика геосфер»: материалы докл. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 216–220.
4. Устройство для измерения профиля температуры: Полезная модель RU 139660 U1 / Тагильцев А.А., Черанев М.Ю., Гончаров Р.А.; заявл. 10.01.2014; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11.