

9. Решетняк С. В. Ранжирование трасс Северного морского пути по критерию гидрографической обеспеченности / С. В. Решетняк, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 3 (53). — С. 55–57.

10. Решетняк С. В. Оценка плотности распределения вероятности локальных поднятий дна в междугалсовом пространстве / С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков // Навигация и гидрография. — 2006. — № 23. — С. 111–115.

УДК 574, 528.422

И. В. Кожухов,
канд. геогр. наук, проф.;

Е. Н. Колосков,
асп.;

Ю. Г. Фирсов,
канд. техн. наук, доц.

ЭЛЕКТРОННАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОГРАФИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ДАННЫХ ПО МОРФОЛОГИИ И ГЕОЭКОЛОГИИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

ELECTRONIC ENGINEERING HYDROGRAPHY AND THE PROSPECTS OF OBTAINING NEW RESULTS ON THE MORPHOLOGY AND BOTTOM ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF THE ARCTIC SEAS

Рассмотрены вопросы использования гидрографических информационных технологий для исследования микрорельефа арктических морей. Современные средства съемки, реализованные в виде многолучевых эхолотов и батиметрических гидролокаторов бокового обзора, позволяют получать детальную информацию о топографии дна. Новые компьютерные средства визуализации цифровых моделей дна, полученных по результатам съемки, в виде 3D изображений дают настолько реалистичную картину рельефа, что речь может идти об изучении и исследовании подводных ландшафтов во всем их многообразии. Трехмерная визуализация дает возможность не только наблюдать морфологические особенности рельефа, но и получать информацию о его генезисе, что открывает новые перспективы изучения дна средствами гидроакустики в рамках различных направлений морской деятельности, включая морскую экологию. Приводятся изображения особых форм микрорельефа дна, часто встречающихся в арктических морях, связанные с различными нарушениями поверхности дна. Основное внимание уделено особенностям подводного рельефа в виде борозд, оставленных на грунте, вероятнее всего, стамухами, и положительным формам дна в виде куполообразных возвышений типа «гидролакколитов» или «булгуниях» — уникальных форм микрорельефа, как правило, приуроченных к донному газопроявлению в форме метановых выбросов.

The study examines modern hydrographic technologies for the Russian northern seas investigations. The modern hydrographic equipment is presented mainly as multibeam echosounders and bathymetric side scan sonars providing the possibility to obtain the detailed seabed topography. The hydrographic software tools used to process and analyze the bathymetry can create the seafloor digital terrain models with the high degree of resolution and provide 3D visualization. These new possibilities provide such realistic view of the sea bottom relief and environment that can be characterized as the marine landscapes. Thus it became possible to investigate the relief morphological peculiarities and obtain the information about the relief genesis. This opens the new opportunities for using the acoustic techniques for various types of marine activity including the bottom environmental study. The arctic sea specific microrelief images are provided to show the abnormality of the bottom surface. The main attention is paid to specifics and bottom features such as trenches the grounded hummock traces and dome-shaped elevations of the Pingo-type — unique forms of microrelief usually confined to the bottom get preview in the form of methane emissions.

Ключевые слова: гидроакустика, многолучевые эхолоты, стамухи, газогидраты, гидролакколиты, трёхмерная графика, термокарст, эксплозия, метановые выбросы, клатраты.

Key words: hydrographic technologies, hydro acoustics methods, submarine gas-hydrates, seafloor gas venting, multi beam echo sounder, pingo, thermokarst, clathrate hydrate, 3D visualization.

ВЫСОКОШИРОТНЫЕ полярные зоны нашей планеты являются чрезвычайно важными природными системами. Степень их благополучия в экологическом отношении может заметно влиять на полушария в целом. Очередной этап освоения Арктики повлечёт за собой целый ряд проблем климатического и экологического характера. Кроме того, отечественной наукой ещё в 1969 г. в разных местах океанического дна был обнаружен новый ресурс энергоносителей, так называемых *газогидратных месторождений* [1]. В настоящее время с появлением новейших гидроакустических комплексов стало возможным более эффективно решать возникшие перед наукой задачи, связанные с фактором экологического риска, а также с вопросами создания новой ресурсной базы [2]. Планета Земля представляет собой открытую термодинамическую систему, источниками энергии которой служат внутрипланетные процессы, в частности, — радиоактивное и глубинное тепло экзотермических реакций, во всём их многообразии. Тепловой поток литосферы не всегда выглядел одинаково. На протяжении истории Земли возникали и, возможно, ещё будут наблюдаться периоды активизации тепловой разгрузки, сопровождаемые *геологическими революциями* с присущим им усилением сейсмичности, вулканизмом и, как следствие, магматическими процессами [3].

Следует отметить, что земная кора как физическое тело может вести себя под действием возникающих нагрузок двояко. С одной стороны, в процессе влияния медленных статичных сил литосфера проявляет свойства пластичности, образуя в результате нарушения первичного залегания горных пород складчатые структуры, или *пликативные дислокации* (от лат. *plico* — складка и *dislocatio* — смещение). В отдельных случаях, когда цельность складчатых форм попутно нарушается секущими сквозь их толщу прорывами магмы, возникают дислокации несколько иного, *дизъюнктивного типа* (от лат. *disjunction* — разобщение) [4]. С другой стороны, в случае приложения импульсных нагрузок внешняя оболочка Земли, наоборот, реагирует как хрупкая субстанция, раскалываясь на отдельные блоки и образуя внутри себя сквозные трещины (разрывы) нередко гигантских размеров, измеряемых сотнями километров (рифты). Сквозь эти разрывы идёт мощный поток тепловой энергии в основном вследствие радиоактивного распада U (урана), Th (тория) и K (изотопов калия) [5]. Указанные ранее процессы собраны в единую группу факторов, известную как *эндогенные*, или *внутриземные силы*, которые наряду с *экзогенными* (внешними) силами призваны формировать контуры земной поверхности, т. е. её рельеф. Если разнообразие форм на суше доступно для непосредственного (контактного) исследования, то элементы донной поверхности можно изучать главным образом неконтактными (дистанционными) методами. Таким образом, эффективность подводных исследований, в значительной мере, зависит от уровня существующей на данный момент технической оснащённости.

Существенный технологический прорыв в области гидроакустики, позволяет осуществлять визуализацию рельефа, т.е. получать изображение дна в объёмном виде [6] – [8]. Имеется в виду визуализация рельефа дна в формате трёхмерного изображения (3D). Данный метод применим, в частности, в отношении элементов микрорельефа. Всё зависит от масштабов конкретной съёмки. Речь идёт, в первую очередь, об использовании многолучевых эхолотов. Применение указанных средств явилось ведущей тенденцией в современной гидрографии. Как следует из публикаций [6], [8], мелководный вариант многолучевых эхолотов способен работать на частотах в диапазоне от 200 до 400 кГц, используя при этом линейно-частотную модуляцию, и обеспечивать управление сектором излучения. Количество батиметрической информации получается здесь настолько объёмным, что возникает необходимость применения батиметрических цифровых моделей релье-

фа, реализация которых возможна на основе регулярных сеток (гридов) и нерегулярных триангуляционных сеток. Одновременно электронная гидрографическая информационная система позволяет собирать и обрабатывать батиметрическую информацию в целях оперативной визуализации цифровой модели.

В гидрографической практике на протяжении длительного периода времени основное внимание в рамках отрасли было уделено задачам сугубо навигационного характера. Однако в связи с потребностями в изучении экологической и ресурсной составляющих Мирового океана изменения данной ситуации стали неизбежными. Нами предпринимаются попытки сосредоточиться именно на новом направлении в гидрографии, которое можно рассматривать как *береговую инженерию, инженерно-ресурсную экологию* или *подводное ландшафтоведение*. Так или иначе, но воспроизведение рельефа в объёмном виде значительно удобнее для человеческого восприятия. Оно позволяет даже неспециалистам легко фиксировать на уровне опознания образа *подвижные элементы* поверхности дна, ранее с трудом узнаваемые в двумерном (плоском) варианте. В результате значительно упрощается способ контроля этапов их формирования и перемещения с хронологической привязкой к конкретным штормовым циклам [7], [9]. Таким образом, открываются новые перспективы в исследовании динамики прибрежных участков морей, включая русловые процессы на реках.

Наряду с воздействием гидрогенного свойства, непосредственно связанным с динамикой водных масс (волн, течений, приливов) и не менее значимым следует считать фактор иного характера, а именно явление *активного термокарста*. В условиях северных широт указанный процесс способен оказывать заметное влияние на стабильность дна в определённых его точках. Внимание к данному явлению, например, может оказаться весьма актуальным в случае прокладки по дну подводных трубопроводов. При крупномасштабном промере трёхмерная модель позволяет легко выделять в пространстве статичные элементы рельефа (со знаком «плюс» или «минус») типа бугров пучения, западин, аласов, отслеживая при этом процессы их образования и развития. Дело в том, что при прокладке подводных коммуникаций в условиях криолитозоны значительно повышается уровень экологического риска. Движимый по трубопроводу нефтяной поток, к примеру, сопровождается нагревом корпуса трубы, что способно вызвать так называемый эффект *«тёплого крота»*, т. е. протаивания подстилающей грунтовой массы. Результатом может стать нарушение целостности самой трубопроводной магистрали [10].

Графика цифровой модели способна обнаруживать на поверхности дна, в том числе многочисленные борозды своеобразной конфигурации (рис. 1 – 3). Можно предположить, что они генетически связаны с подвижками крупных глыб донного льда, стамух.

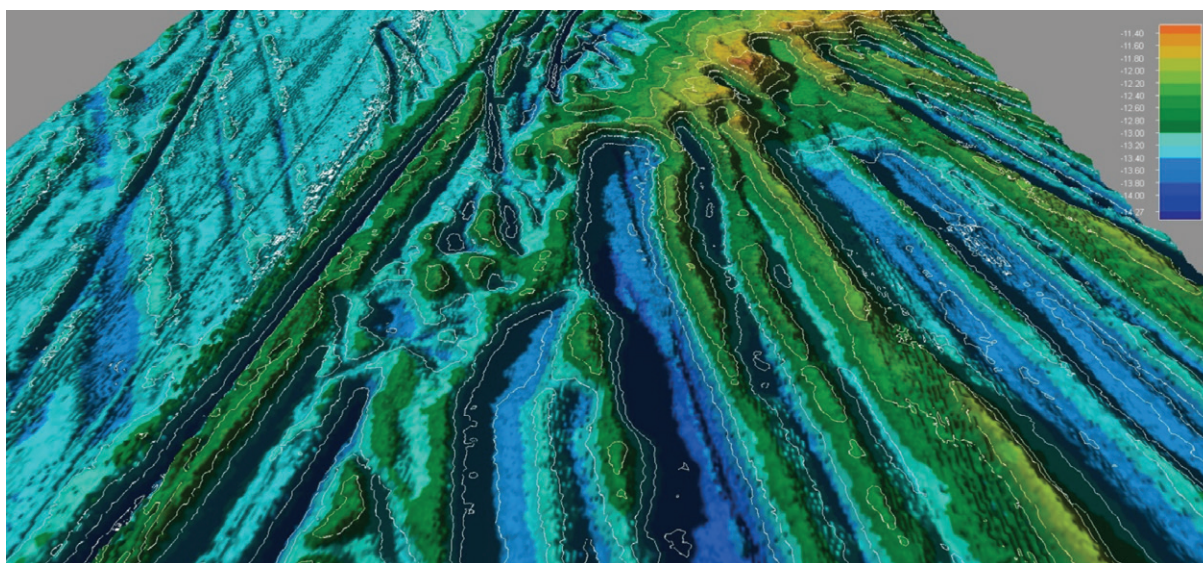


Рис. 1. Продольные и поперечные борозды на поверхности дна в условиях морского мелководья (район бара Обской губы, глубина 12 – 14 м)

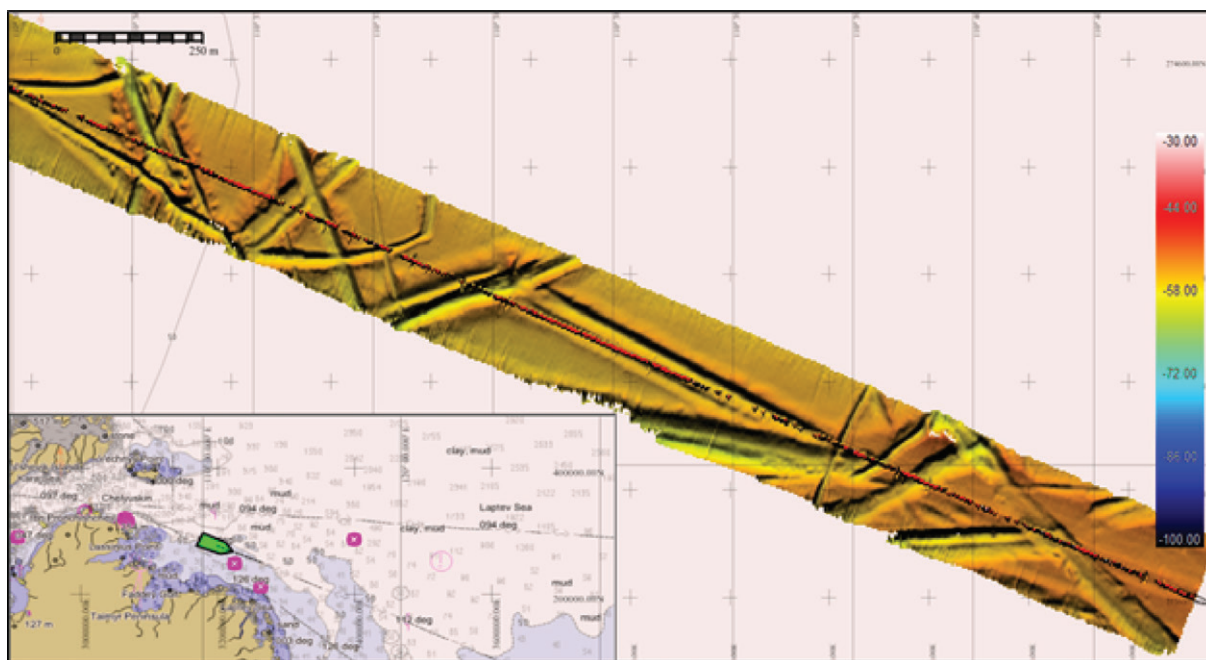


Рис. 2. Фрагмент плоского морского дна с характерными бороздами на его поверхности (район юго-западной части моря Лаптевых)

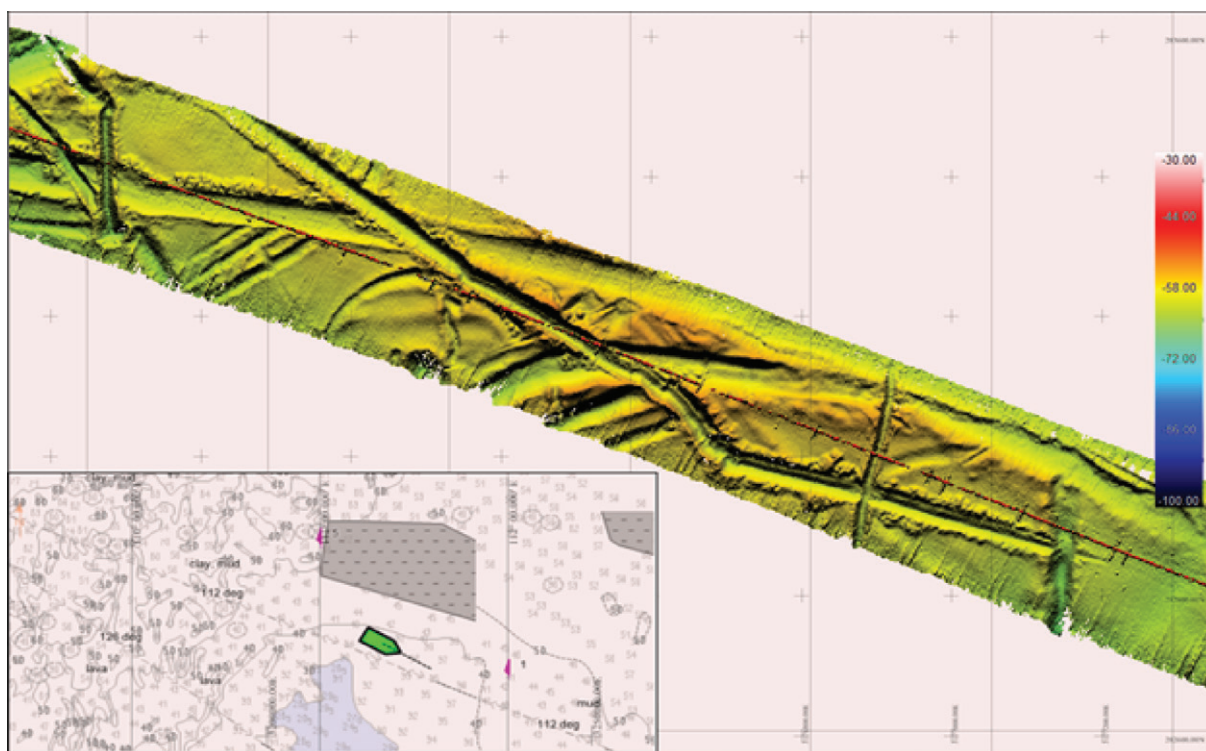


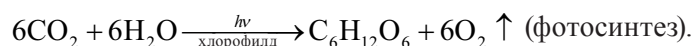
Рис. 3. Фрагмент плоского морского дна с характерными бороздами на его поверхности (район южной части моря Лаптевых)

Процессы смещения стамух в высокоширотных морских водоёмах мало изучены. Однако в связи с прокладкой тех же подводных коммуникаций (трубопроводы, кабельная связь и т. д.) данное направление может оказаться своевременным и чрезвычайно актуальным. Заметим, что ранее подобные процессы, вызванные подвижками стамух, было предложено называть *гляцио-коррозией* (от лат. *glacies* — лёд и *corrado* — соскребать) [7]. Предложенный термин по своему

смыслу, однако, подходит, скорее, к случаям с коренными кристаллическими породами: *трогами*, *бараными лбами* или *курчавыми скалами*. При наличии подстилающих грунтов сыпучего типа более приемлем известный в научном обиходе термин — «экзарация» (от лат. *exaratio* — выпаривание), когда при внешнем воздействии на ту или иную поверхность, состоящую из осадочных пород, образуются борозды или штрихи (см. рис. 2 и 3).

В итоге, для обозначения комплексного подхода в рамках развивающейся гидрографической ветви сам собой напрашивается обобщающий термин — «батиметрический мониторинг». Как выяснилось, возможности современной гидрографии не исчерпываются рассматриваемой тематикой. Последние материалы натурных наблюдений показали эффективность использования методов новейшей гидроакустики при исследовании иных проблем. В первую очередь, это обусловлено экологической (климатической) проблемой, а также фактором поиска дополнительных или альтернативных источников природных ресурсов.

В настоящее время широко известно, что климатическая ситуация на нашей планете в значительной степени зависит от концентрации в атмосфере свободного углекислого газа. Последнее означает, что в случае пополнения воздушной среды указанным химическим соединением усиливается *парниковый эффект*. История Земли такова, что на протяжении ряда геологических эпох существовал природный механизм *вывода* из атмосферы свободного CO_2 за счёт процессов карбонизации и фотосинтеза по следующим схемам:



Именно углерод в связанном состоянии стал главным элементом при формировании на планете Земли колоссальных запасов горючих ископаемых и одновременно послужил составной частью карбоната кальция (CaCO_3) в качестве основного материала при образовании коралловых рифов, атоллов, в том числе известковых островов. Процессы подобного рода принято называть *консервацией*, или переходом углерода в связанную фазу (*биологические тупики*). Однако за последние десятилетия в атмосфере неожиданно стал прослеживаться процесс противоположного свойства, когда концентрации свободного CO_2 в воздухе вопреки существовавшей ранее природной схеме начали заметно возрастать. Большинство специалистов склонны видеть в этом техногенную причину. Сжигание человеком топлива и горючих материалов вносит ежегодно в атмосферу не менее $1 \cdot 10^{10}$ т углекислого газа (*биотехногенный эффект*). Подобная тенденция, как считают, не может не повлиять на характер климата планеты в сторону его потепления. Последствиям такого процесса даются неутешительные прогнозы. Неизбежным, к примеру, станет таяние полярных льдов, сопровождаемое катастрофическим подъёмом уровня Мирового океана, что должно превратить современные материки в архипелаги. Но особую опасность при глобальном таянии полярных льдов могут представлять разрушения *клатратов* — кристаллических каркасов во льду, полости которых заняты молекулами метана (CH_4), относящегося, наряду с CO_2 , к категории тепличных газов. По мере предполагаемого таяния, высвобождающийся из ледовых полостей метан будет поступать в атмосферу в несоизмеримо больших количествах, чем от всех искусственных источников, вместе взятых. Возможные последствия подобного сценария трудно осмыслить в полном объёме и получить более или менее надёжный прогноз. Дело в том, что парниковая активность метана в 23 раза выше по сравнению с углекислым газом.

Совсем недавно наблюдениями из космоса было обнаружено в пределах суши (Ямало-Ненецкий автономный округ) несколько глубоких западин, внешне напоминающих кратерные ячейки. Нижняя часть этих «колодцев» оказалась заполненной водой, а непосредственно у надводных горизонтов в пробах воздуха было зафиксировано повышенное содержание метана. По мнению доктора геолого-минералогических наук А. Н. Портнова, происходит так называемая *метановая эксплозия*, связанная с планетарными изменениями климата, вызванная протаиванием и проседанием в тех или иных местах толщ вечной мерзлоты [11].

По материалам проводимых в мире геофизических съёмок в толщах морского дна помимо заполярной зоны, солидные запасы метана (CH_4) в связанном состоянии обнаружены и на других широтах. В виде твёрдых гидратов (соединений метана с водой) они найдены в толще органических осадков во многих других зонах Мирового океана. Отдельный интерес, в частности, вызывают места стыковки материковой и океанической части земной коры. Известно, что указанные зоны являются областью высоких механических напряжений, за счёт которых, вероятно, осуществляется периодически наблюдаемое «выдавливание» наружу метана и его последующая эмиссия в окружающее водное пространство. Как следует из иностранных источников [12] и [14], запасы метана в форме газогидратов нередко обнаруживаются прямо на поверхности морского дна. Поднятые со дна моря куски газогидрата внешне напоминают «вываленные в грязь» обломки льда. Собственно, это и есть лёд, но с высоким содержанием метана. По имеющимся оценкам, запасы указанного продукта в глубинах океана являются весьма значительными. Согласно некоторым данным, около 50 % всего имеющегося на Земле углерода сосредоточено именно в этих гидратах.

Однако на практике трудно представить себе возможность появления в недалёком будущем соответствующих технологий по добыче такого энергоносителя в промышленных масштабах. Для освобождения связанного ледовыми структурами метана предполагается, в частности, искусственный обогрев газогидратных монолитов. Такой подход представляется маловероятным, поскольку речь в данном случае идёт не о каких-либо локализованных в пространстве источниках, а об обширных газогидратных полях. Так, летом 2014 г. в процессе исследования юго-западной части акватории Карского моря (рис. 4) с использованием сонаров новейшего образца одним из авторов настоящей статьи в качестве особенностей подводного рельефа было зафиксировано куполообразное возвышение над ровной поверхностью дна. Сам по себе этот факт мог представлять лишь сугубо геоморфологический интерес. Однако расположение данного бугристого образования совпало с местом выброса (эксплозии) из земных недр облака газовых пузырей. Явление это было зафиксировано непосредственно в режиме реального времени в виде точечного газового факела.

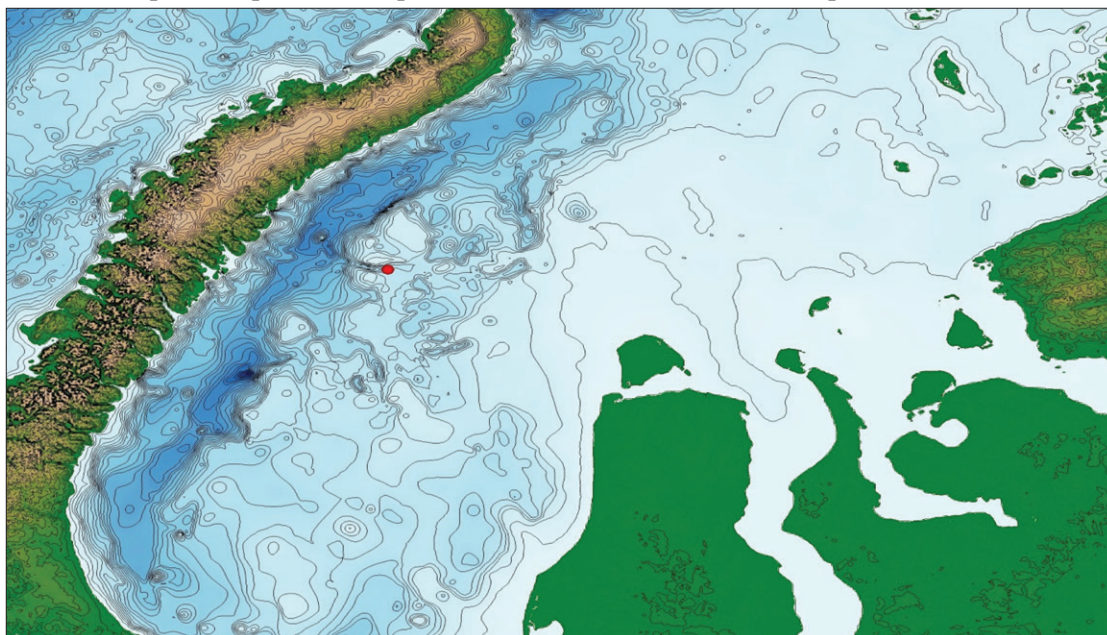


Рис. 4. Карта-схема юго-западной части Карского моря
(место обнаруженной эксплозии обозначено красным кружком)

В данном случае, скорее всего, речь идёт о метановом газопроявлении, которому в последнее время, как отмечалось ранее, уделяется столь серьёзное внимание в периодической научной зарубежной литературе [12] – [20]. Наивысшая точка обозначенного бугристого образования соответствовала глубине 40 м, а его относительная высота (превышение над окружающим плоским дном) составила 30 – 40 м (рис. 5).

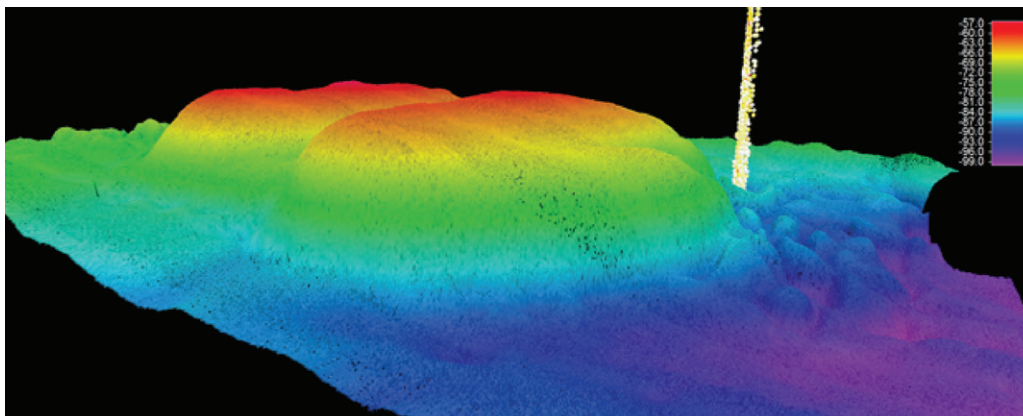


Рис. 5. Положительная форма подводного рельефа на дне юго-западной части Карского моря

По имеющимся в настоящее время материалам трудно определить, является ли процесс газового проявления следствием каких-либо морфологических подвижек или, наоборот, обозначенная на рисунке выпуклость возникла как результат взрывных процессов. Обнаруженная форма внешне напоминает повсеместно распространённые на суше в районах вечной мерзлоты бугры пучения. Высота таких бугров относительно окружающих равнин может достигать 30 – 40 м. Их диаметр в нижнем сечении измеряется сотнями метров, а, порой, и первыми километрами. Но в контексте разрабатываемой тематики речь идёт лишь о гидролакколитах. По сравнению с обычными формами пучения особенность этих форм заключается в обязательном наличии в их основании ледовых глыб. В Якутии такие формы называют *булгуньяхами*, а в Забайкалье — *коврижками*. Оба термина введены в научный обиход [21].

Вулканическая деятельность на Земле, с характерными для неё формами рельефа, относится к категории *эндогенных процессов*. Сюда же относят и особую разновидность вулканов, проявляющих лишь сольфатарную активность (выделение из недр горячих газов и воды). Скорее всего, данное образование, в силу его линейных и морфологических характеристик, генетически более подходит к категории гидролакколитов [22]. Что касается выявленной эксплозии, то на сегодняшний день нет оснований делать какие-либо окончательные выводы относительно её генезиса. Дело в том, что в основании рассматриваемого объекта был обнаружен в земной коре с помощью низкочастотной аппаратуры тектонический разлом, т. е. утверждать о сугубо экзогенном характере наблюдаемого эффекта преждевременно.

Безусловно, рассматриваемый феномен в исключительно научном плане может вызывать у специалистов тот или иной интерес, но в конкретной публикации главным служит не столько происхождение данного бугра, сколько факт пространственной привязки наблюдаемой точечной эксплозии к определённой форме рельефа. При более подробном изучении обнаруженной формы чётко просматривается ряд кольцевидных ячеек ближе к её основанию, напоминающих сквозные отверстия. Скорее всего, эти точечные углубления служат как раз каналами выхода газа. Последнее, собственно, и подтверждается непосредственным актом газопроявления над жерлом одной из ячеек на момент съёмки (рис. 6) — [8]. Если подтвердится закономерность пространственной привязки очагов дегазации к конкретным подводным формам рельефа, вопросы поиска и картирования участков альтернативных носителей энергии в пределах доступных глубин могут явиться весьма актуальным научным направлением с большой инженерной перспективой. Именно локализованный (струйчатый) вариант газопроявления, по сравнению с его площадными формами, представляется наиболее доступным в плане реализации конкретных проектов по добыче озвученного энергоносителя в промышленных масштабах. В связи с этим весьма оптимистично для гидрографии звучат выводы отечественных исследований, опровергающие тезис о повсеместности распространения газовых гидратов именно в площадном варианте. По материалам российских геологов, реальное распространение данного энергоносителя носит *селективный характер*, т.е. встречается в виде очаговых скоплений [1].

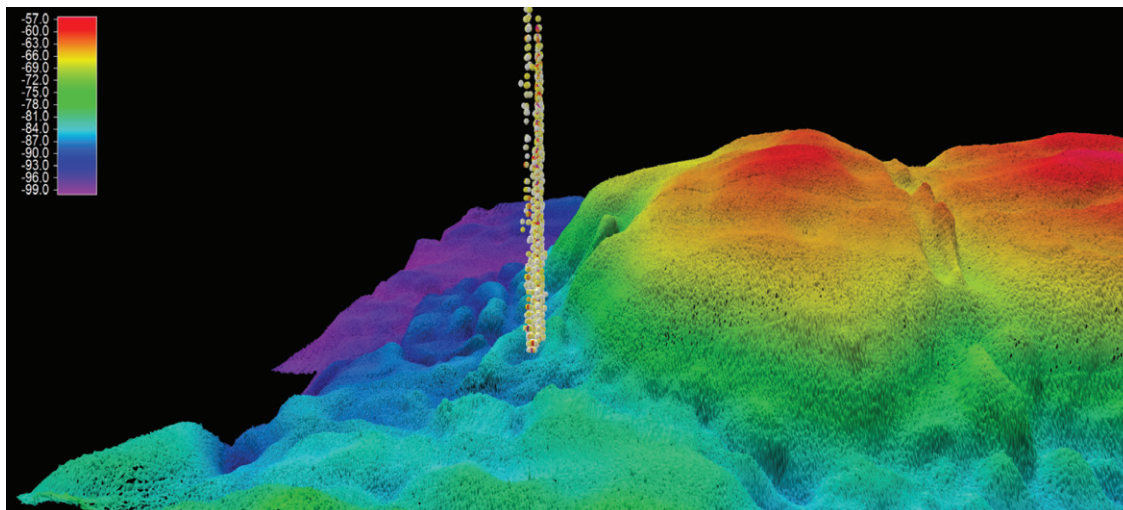


Рис. 6. Визуализация донного газопроявления в программе «Fledermause»

По нашему мнению, вероятнее всего, подобные локализованные очаги (часть из них) генетически должны быть приурочены к тем или иным формам подводного рельефа. Таким образом, следует предположить, что фактор газопроявления относится к категории процессов экзогенного свойства, и, скорее всего, никак не связан с глубинными процессами в земной коре, в том числе, с сульфатарным вулканизмом. В таком случае именно *морфологический подход* может оказаться решающим в методологии поиска промышленных залежей газогидрата. Как свидетельствуют иностранные источники, из одного кубического метра твёрдого гидрата можно выделить до 164 м³ газообразного метана. Таким образом, укоренившееся понятие «болотный газ» ныне не укладывается в привычные семантические рамки данного словосочетания.

Выводы

1. Достижения технического прогресса в области геоматики обеспечили появления нового научного направления – *электронной инженерной гидрографии*.
2. На небольших глубинах (менее 100 м) применение современных гидроакустических средств в виде многолучевых эхолотов при выполнении площадной съемки с надводных судов обеспечивает возможность создание детальной цифровой модели рельефа.
3. Новые гидрографические информационные технологии трехмерной визуализации способны на основе детальных цифровых моделей рельефа обеспечить создание реалистичных изображений подводного микрорельефа в виде «синтезированных» подводных ландшафтов.
4. Применение новых гидроакустических и гидрографических информационных технологий ведет к новому этапу изучения морфоструктур и генезиса подводного рельефа. Это обеспечит как более высокий уровень безопасности мореплавания, так и качественно новый уровень научных знаний о рельефе. Практический аспект в геоморфологии заключается в научном обеспечении решения задач при проектировании и строительстве инженерных сооружений на шельфе.
5. Проблема изучения морфологии и генезиса подводного рельефа особенно актуальна для арктических шельфов, расположенных в зонах вечной мерзлоты и связанных с ними газогидратных месторождений.
6. Особое внимание следует обратить, во-первых, на факт появления нового поколения гидроакустической аппаратуры и специализированных информационных технологий пространственной визуализации цифровых моделей рельефа дна, позволяющих минимизировать экологические риски при освоении шельфовых морей, а, во-вторых, на открывшуюся перспективу целенаправленного оперативного поиска очагов концентрации газогидратных месторождений с помощью тех же акустических средств и информационных технологий.

Список литературы

1. Гинсбург Г. Д. Субмаринные газовые гидраты / Г. Д. Гинсбург, В. А. Соловьев. — СПб.: ВНИИ «Океангеология», 1994. — 199 с.
2. Каминский В. Д. Минерально-сырьевые ресурсы арктической континентальной окраины России и перспективы их освоения / В. Д. Каминский, О. И. Супруненко, А. Н. Смирнов // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 3 (15). — С. 52–61.
3. Галеркин Л. И. Тихий океан / Л. И. Галеркин, М. Б. Бараш, В. В. Сапожников [и др.]. — М.: Мысль, 1982. — 316 с.
4. Каттерфельд Г. Н. Лик Земли и его происхождение / Г. Н. Каттерфельд. — М.: Географгиз, 1962. — 152 с.
5. Семененко Н. П. Континентальная кора / Н. П. Семененко. — Киев: Наукова думка, 1975. — 197 с.
6. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-история, 2010. — 348 с.
7. Фирсов Ю. Г. Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 17–23.
8. Фирсов Ю. Г. Новый этап батиметрических исследований северных акваторий России на примере Карского моря / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов, Е. Н. Колосков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 115–124.
9. Кожухов И. В. Системный подход к изучению потоков наносов в мелководной зоне морей для обеспечения нормального режима судоходства / И. В. Кожухов // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 3 (61). — С. 30–34.
10. Русак О. Безопасность жизнедеятельности / О. Русак, К. Малаян, Н. Занько. — СПб.: Изд-во «Лань», 2001. — 448 с.
11. Портнов А. Н. Опасные дыры Земли / А. Н. Портнов // Природа. — 2014. — № 11 (1191). — С. 94–96.
12. Keith A. Kvenvolden. Potential effects of gas hydrate on human welfare / A. Keith // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. — 1999. — Vol. 96. — P. 3420–3426.
13. Naudts L. Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr paleo-delta, NW Black Sea / L. Naudts, J. Greinert, Y. Artemov [et al.] // Marine Geology. — 2008. — T. 251. — №. 3. — С. 253–267.
14. Miriam Kastner. Oceanic minerals: Their origin, nature of their environment, and significance: Proc. Natl. Acad. Sci. USA / Kastner Miriam. — 1999. — Vol. 96. — P. 3380–3387.
15. Paull C. Realizing the Energy Potential of Methane Hydrate for the United States [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12831 (дата обращения: 18.05.2015 г.).
16. Paull C. K. Seafloor geomorphic manifestations of gas venting and shallow subbottom gas hydrate occurrences / C. K. Paull, D. W. Caress, H. Thomas [et al.]. — Geosphere, 2015. — 11(2). — P. 491–513.
17. Huggett R. J. Fundamentals of Geomorphology / R. J. Huggett. — London: Routledge, 2007. — 2 Ed. — 458 p.
18. Shakhova N.E. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle / N. E. Shakhova [et al.]. — Geophysical Research Letters. — 2005. — Vol. 32.
19. Weber T. [et al.]. Acoustic estimates of methane gas flux from the seabed in a 6000 km² region in the Northern Gulf of Mexico / T. Weber, L. Mayer, K. Jerram [et al.] // Geochem. Geophys. Geosyst. — 2014. — Vol. 15. — P. 1911–1925.
20. Westbrook G. Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin // Geophysical Research Letters. — 2009. — Vol. 36. — L15608.
21. Втюрина Е. А. Булгуннях: гляциологический словарь / Е. А. Втюрина / Ред. В. М. Котляков. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 57 с.
22. Воскресенский К. С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России / К. С. Воскресенский. — М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2001.