

УДК 550.8

В. С. Захаренко, В. А. Шлыкова, М. С. Радченко

**Роль эндогенной составляющей в формировании углеводородов
в переходной зоне "континент – океан"
Шпицбергенско-Баренцевской континентальной окраины**

V. S. Zakharenko, V. A. Shlykova, M. S. Radchenko

**Role of the endogenous component in formation of hydrocarbons
in the "continent – ocean" transition zone
of the Spitsbergen-Barents continental margin**

Аннотация. Произведен комплексный анализ результатов морских геолого-геофизических работ; выявлена роль эндогенных факторов в миграции и составе углеводородов в зоне Поморского прогиба и континентальной окраины.

Abstract. The comprehensive analysis of results of marine geological and geophysical surveys has been carried out; the role of endogenous factors in migration and composition of hydrocarbons in the Pomor trough area and the continental margin has been revealed.

Ключевые слова: дегазация Земли, Поморский прогиб, геодинамика, углеводороды.

Key words: degassing of the Earth, Pomorski trough, geodynamics, hydrocarbons.

Введение

В настоящее время в связи с повышением качества аппаратуры при изучении шельфа появилась возможность сопоставлять и сравнивать результаты "приповерхностных" методов исследования (газогидрохимических, пробоотбора (0.7–0.8 м), сейсмоакустических (600–800 м)) с данными, полученными при использовании сейсморазведки МОВ ОГТ (глубина достигает 11 км), а также с других современных геофизических методов; таким образом выявляется не только геологическое строение всей толщи от фундамента до дна, но и пути миграции углеводородов (УВ), что ранее было невозможно ввиду малой глубины освещения разреза.

Цель данного исследования – выявить роль эндогенных факторов, установить соотношение глубинных и биогенных углеводородов, выделить участки скопления водорастворенных газов и сопоставить их с потенциальными ловушками как традиционных углеводородов, так и газогидратов. Обобщающим результатом исследований стало выявление приуроченности выделенных потенциальных ловушек УВ к области внедрения мантийного диапира и, как следствие, возможность объяснения проблемы дегазации Земли.

Материалы и методы

Фактической основой исследования послужили результаты региональных площадных комплексных геолого-геофизических работ по поиску нефти и газа, выполненные ОАО МАГЭ и включающие сейсморазведку МОВ ОГТ, непрерывное сейсмоакустическое профилирование, грави- и магниторазведку, донное опробование, газогидрохимические исследования. Авторы принимали участие в процессе интерпретации материалов, полученных при использовании указанных методов.

Интерпретация материалов сейсморазведки МОВ ОГТ осуществлялась с помощью цифровой интерактивной системы "ИНПРЕС-5". Эта система позволяет выполнять корреляцию и увязку прослеживаемых горизонтов, строить карты изохрон, скоростей и глубин. Окончательные структурные построения и оформление графических приложений выполнялись в среде ГИС ArcView 3.2.

Результаты и обсуждение

Общие сведения о районе исследования. Район исследования расположен в западной части Баренцевской шельфовой плиты, в переходной зоне к Северо-Атлантической океанической впадине (рис. 1). Баренцевоморский шельф формировался в течение фанерозоя, а Северо-Атлантическая океаническая впадина начала свое развитие в кайнозое. Геологические процессы, происходившие в пределах разных геотектонических элементов земной коры (связанные с процессами становления структуры Баренцевоморского шельфа на протяжении фанерозоя; определяемые началом океанического спрединга Северной Атлантики в кайнозое), повлияли на формирование

и нашли отражение в структуре Баренцевоморской западной континентальной окраины. В результате континентальная окраина представляет собой формирующийся и в настоящее время кайнозойский осадочный бассейн, наложенный на более древние бассейны фанерозоя, что является весьма важной характеристикой условий формирования углеводородного потенциала бассейна континентальной окраины.

Основной надпорядковой структурой океанического дна западной части Шпицбергенского шельфа является субмеридиональный Поморский периокеанический прогиб, который рассматривается в качестве западной границы Баренцевской шельфовой плиты. По данным сейсморазведки МОВ ОГТ и морского бурения, характеристики осадочного комплекса в Поморском прогибе определяются блоковым строением переходной зоны "континент – океан", мощность осадочного комплекса резко изменяется и доходит до 10–11 км.

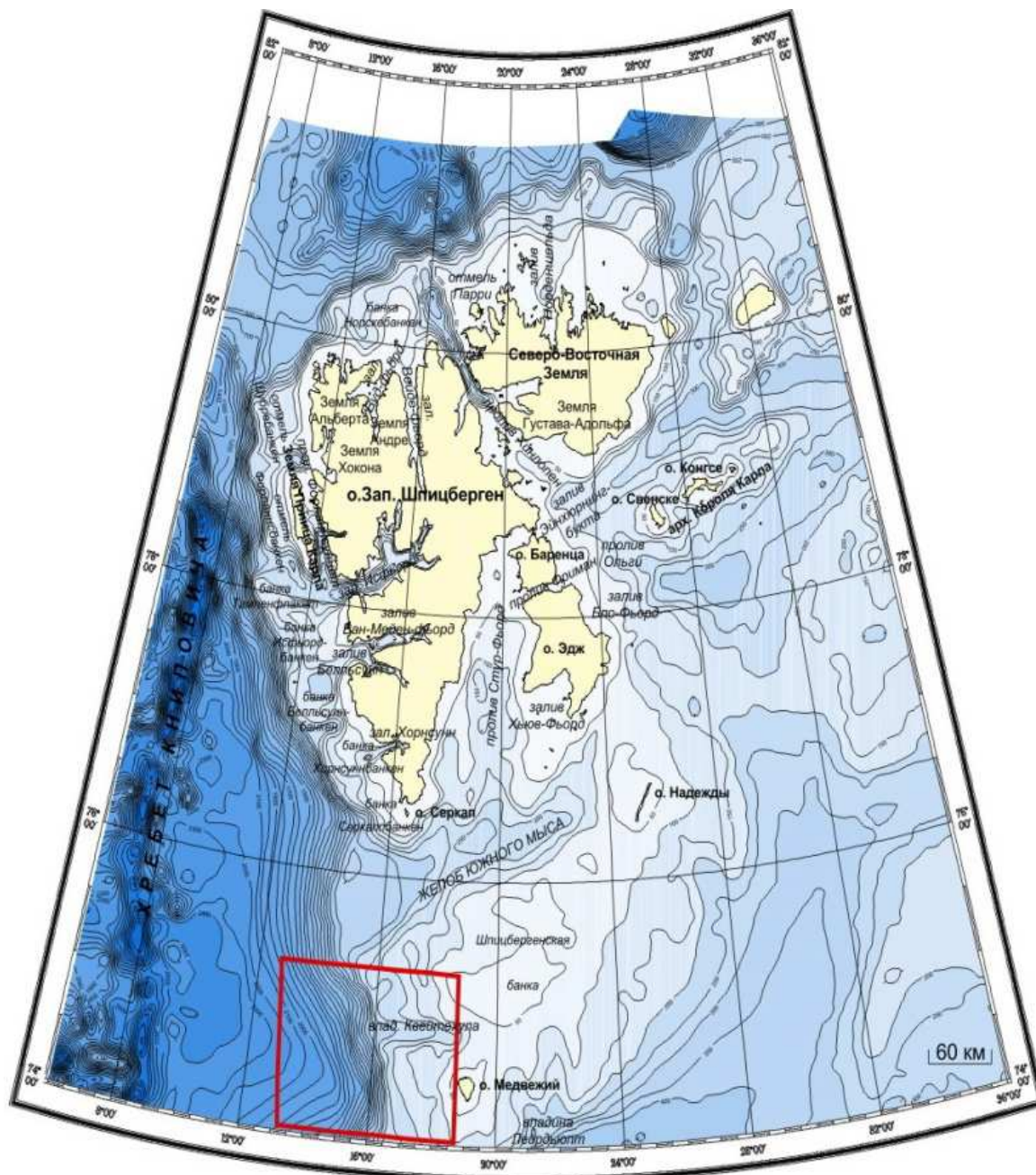


Рис. 1. Схема расположения района исследования

Геохимические исследования органического вещества в донных отложениях. Для изучения органического вещества (ОВ) донных осадков Южно-Шпицбергенского шельфа выполнялись анализы на содержание в пробах органического углерода и суммарных нефтяных углеводородов. Распределение органического вещества является одной из важнейших характеристик геохимических свойств донных отложений. В таблице приведены результаты статистической обработки данных анализов.

Таблица

Распределение геохимических показателей органического вещества

Вещество	max	X_{cp}	2-кратное содержание	3-кратное содержание
Органический углерод	2,4	1,5	1,9	2,1
Углеводороды	1 125	422	797,6	985

Органический углерод. Содержание органического углерода $C_{орг}$ в современных отложениях Южно-Шпицбергенского шельфа определялось посредством "мокрого сжигания" по методу Кноппа на 70 станциях. Данные по распределению $C_{орг}$ необходимы для выявления связей с условиями седиментогенеза и диагенеза. Для исследования условий осадконакопления наиболее информативными являются осадки, залегающие глубже 0,7–0,8 м, так как в верхних горизонтах протекают интенсивные биохимические процессы; $C_{орг}$ в осадках данной акватории распределен крайне неравномерно.

На Шпицбергенском шельфе вблизи берегов, сложенных угленосными осадочными породами, локализуются повышенные концентрации преимущественно аллохтонного $C_{орг}$. Фоновое содержание $C_{орг}$ в осадках для данного региона составляет 1,46–1,68 %.

Пониженными содержаниями $C_{орг}$ (<1,46) отличаются осадки Зюйдкапского желоба и западной части акватории, что обусловлено, возможно, низкими скоростями накопления осадков и первичной продукции планктоногенного ОВ. При малой концентрации $C_{орг}$ в окислительных условиях распад ОВ не изменяет физико-химические условия среды.

Повышенные содержания органического углерода в пределах 1-2 стандартных отклонений (1,68–1,9 %) наблюдаются в осадках на склонах Шпицбергенской банки и отмечены на некоторых станциях Зюйдкапского желоба. На склонах Шпицбергенской банки выявлены также зоны с аномальными содержаниями $C_{орг}$: 2-3 стандартных отклонения (1,97–2,13 %) и более 3 стандартных отклонений (>2,13 %). Содержание $C_{орг}$ зависит от сорбционной активности осадка (сорбционно-активная глинистая фракция), также наблюдается связь содержания $C_{орг}$ с геоморфологической позицией. Высокое содержание $C_{орг}$ здесь по сравнению с глубоководными районами объясняется, вероятно, более высокими скоростями накопления как планктоногенного, так и аллохтонного ОВ, более быстрым его захоронением. В осадках, относительно обогащенных $C_{орг}$, диагенез происходит в восстановительных условиях, о чем свидетельствует их серый цвет и присутствие гидротроиллита. В результате более интенсивной деструкции органического вещества происходит образование карбонатов и сульфидов железа.

Суммарное содержание углеводородов. Суммарное содержание нефтяных ароматических углеводородов определялось спектрофлуоресцентным методом. Углеводородная залежь проявляется на поверхности в результате диффузии или эффузии углеводородов сквозь покрывающие отложения. В морские осадки поступают в различной степени измененные нефть и нефтепродукты техногенного происхождения, поэтому исследовались пробы, отобранные из призабойной части керна глубиной более 0,7–0,8 м.

Можно считать, что УВ имеют здесь эпигенетическую природу, являясь продуктами диффузии или иных форм восходящей миграции из подстилающих более древних отложений. Площадное распределение содержаний УВ в донных отложениях Южно-Шпицбергенского шельфа, залегающих глубже 0,7 м от поверхности дна, представлено на рис 2. Фоновые содержания суммарных УВ соответствуют значениям 422–610 мкг/г. На большей части площади содержания УВ ниже фоновых. Аномальные содержания УВ (2-3) отмечены в северо-западной и северо-восточной частях акватории. В северо-западной части аномалия наиболее контрастная (>3 σ), содержание УВ превышает 985 мкг/г. Данная аномалия может быть связана с сейсмически выделенными аномалиями типа "яркое пятно" и локальными поднятиями.

Газогидрохимические исследования. В процессе данных исследований определены фоновые и аномальные суммарные содержания углеводородных газов в морской воде изучаемого района. Фоновое содержание отвечает 110 нл/л, аномалия I уровня (АI) превышает 140 нл/л, II (АII) – 170 нл/л, III (АIII) – 200 нл/л. Максимальное содержание превышает фоновое в 10 раз и достигает 1030 нл углеводородных газов на 1 л морской воды.

Аномалии суммарного содержания углеводородных газов в воде присутствуют на участках, имеющих разную глубину дна. Наиболее контрастные аномалии отмечены на участках глубиной около 250 м с

небольшими углами склона дна. На больших глубинах аномалии менее контрастные, возможно, что часть газа теряется на пути от глубинного источника. На площади изучаемого района выделено несколько зон с аномальными содержаниями газов в воде (рис. 2).

Аномалии, приуроченные к границе сочленения крупных структурных элементов, являются "яркими пятнами" и расположены в континентальной части исследуемого района. К океанической части приурочены аномалии, которые в целом тяготеют к трансформным разломам.

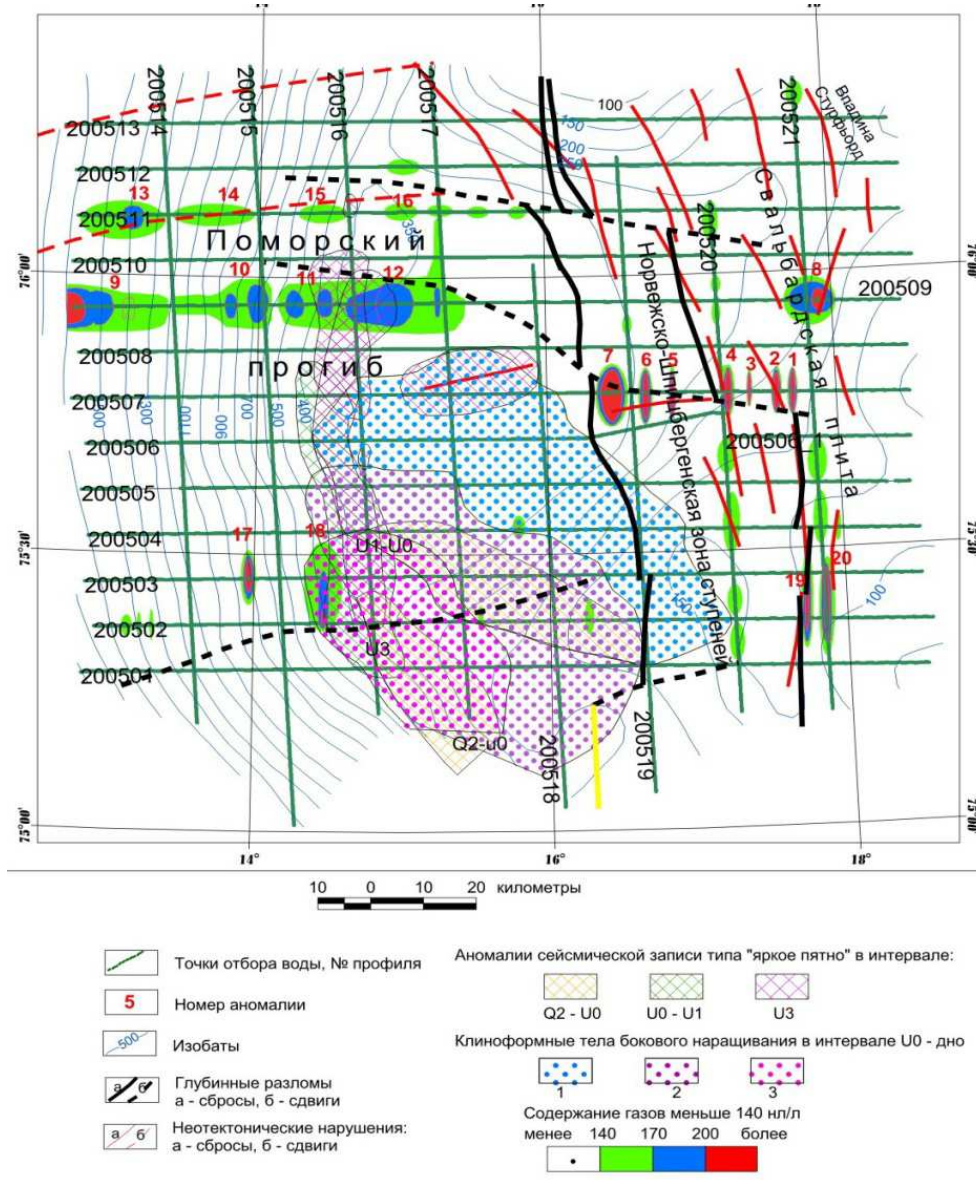


Рис. 2. Схема распределения содержания углеводородных газов в воде

Строение фундамента, осадочного чехла и характер миграции углеводородов (по результатам комплексного анализа). В строении Поморского прогиба на площади исследований выделяются три структурных элемента: северный и южный приподнятые блоки фундамента, разделенные прогибом, вероятно, сформировавшимся в результате сдвиговых движений. Поверхность фундамента представляет собой ступени, сформировавшиеся в результате сбросов по листрическим разломам север-северо-западной ориентировки. В западной части Поморского прогиба развит фундамент океанического типа. По смещению осей синфазности отражающих элементов фундамента можно предполагать развитие двух систем тектонических нарушений – северо-восточного и северо-западного простирания. Разломы северо-западного простирания являются сбросами, а северо-восточного – носят преимущественно сдвиговый характер.

В результате интерпретации волнового поля было выделено пять региональных несогласий, характеризующих основные седиментационные этапы формирования осадочного чехла и ограничивающие крупные сеймостратиграфические комплексы (ССК) – U3, U2, U1, U0, Q2. В пределах ССК выделялись

сейсмостратиграфические подкомплексы (ССПК) и сейсмофациальные единицы (СФЕ). По характеру сейсмического отклика выделено три типа фундамента: океанический ($\Phi_{ок}$), переходный ($\Phi_{п}$) и складчатый (Гекла-хук) ($\Phi_{с}$). В строении осадочного чехла несогласие U3 отражает переход от глубоководно-морских к мелководным условиям осадконакопления и характеризует начальную фазу инверсии бассейна в раннем эоцене. Несогласие U2 связано с обмелением морского бассейна в олигоцене и его инверсией в пределах разломной зоны Хорнсунн. Поверхность несогласия, связанная с ОГ U1, отражает мелководно-морские условия осадконакопления на фоне тектонического подъема территории в позднем миоцене. ОГ U0 отражает денудационные процессы на рубеже позднего плейстоцена – эоплейстоцена и является региональной поверхностью размыва.

Миграция углеводородов наблюдается как по вертикали, так и вверх по склону из океанической части к поверхности, где они скапливаются в литологических, структурно-тектонических и стратиграфических ловушках (рис. 3). В приповерхностной части могут формироваться газогидраты, как правило, погребенного типа (не на поверхности дна).

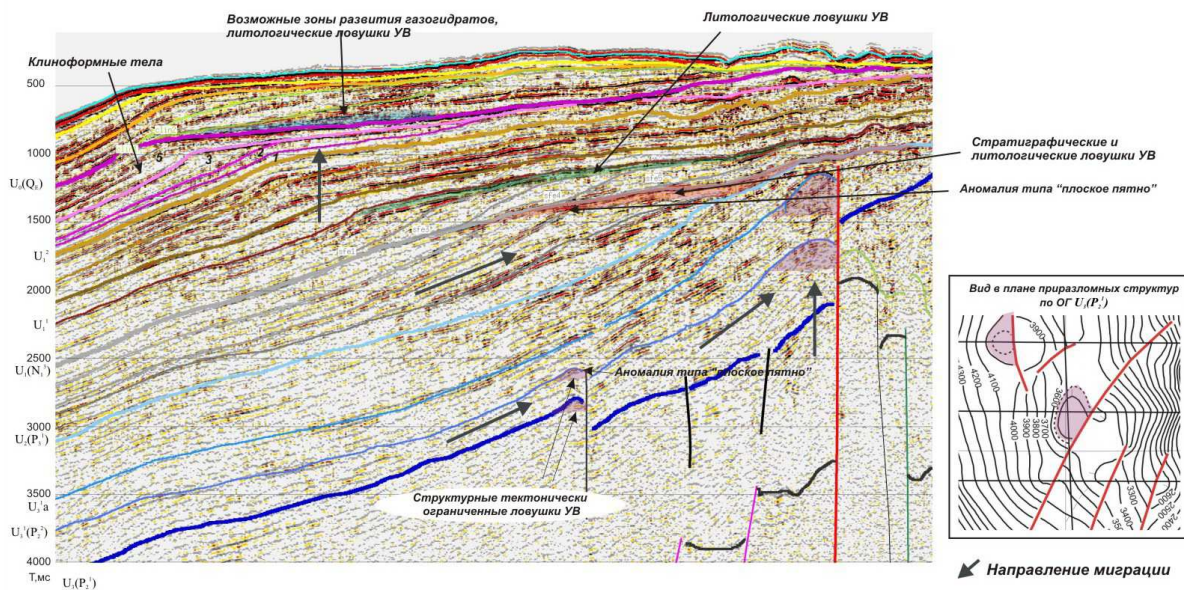


Рис. 3. Пример миграции углеводородов и образования ловушек. Разрез МОВ ОГТ

В Поморском прогибе, по данным гравirazведки, наблюдается аномальное утончение коры в переходной зоне, фиксируемое мощной гравитационной аномалией (Хорнсуннский гравитационный максимум), впервые выделенной М. Тальвани и О. Эдхолмом как гравитационный линеймент. Эту гравитационную аномалию можно объяснить мантийным плюмом.

Основное понятие, обозначенное термином "плюм", было введено Дж. Вильсоном и В. Морганом. Впоследствии оно получило широчайшее распространение. По поводу формирования мантийного диапира существует несколько точек зрения. Одна из моделей разработана и представлена Ю. Е. Погребницким [1]. Другая модель принадлежит Ф. А. Летникову, который интерпретировал плюмы как импульсы интенсивной дегазации жидкого ядра Земли. Их основу составляют восстановленные газы, в первую очередь водород. По мнению А. Н. Дмитриевского и Б. В. Валяева, значительный прогресс достигнут в термодинамическом моделировании состояния углеводородных систем в верхней мантии и их трансформации на пути вторжения в литосферу [2–8].

Совмещая выделенные локальные ловушки различных типов (рис. 3) с гравитационной аномалией, можно заметить, что ловушки УВ в осадочном чехле пространственно приурочены (группируются) к участкам мантийного диапира, располагаясь при этом на различных стратиграфических уровнях (рис. 4).

Таким образом, отложения, способные генерировать углеводороды, находятся в широком стратиграфическом диапазоне (от рифея до палеогена). Наложённые процессы каледонского и герцинского этапов тектогенеза, возможно, привели к мобилизации углеводородов, их трансформации и вторичной миграции в верхние структурные этажи [9].

В итоге проведенных исследований скважин Шпицбергена можно подтвердить правильность результатов предыдущих изысканий и предположить, что миграция углеводородов может происходить

в том числе и из более глубоких источников (мантии), а мантийные диапиры в зоне утонения и растяжения коры переходного типа могли играть роль дополнительного обогревателя.

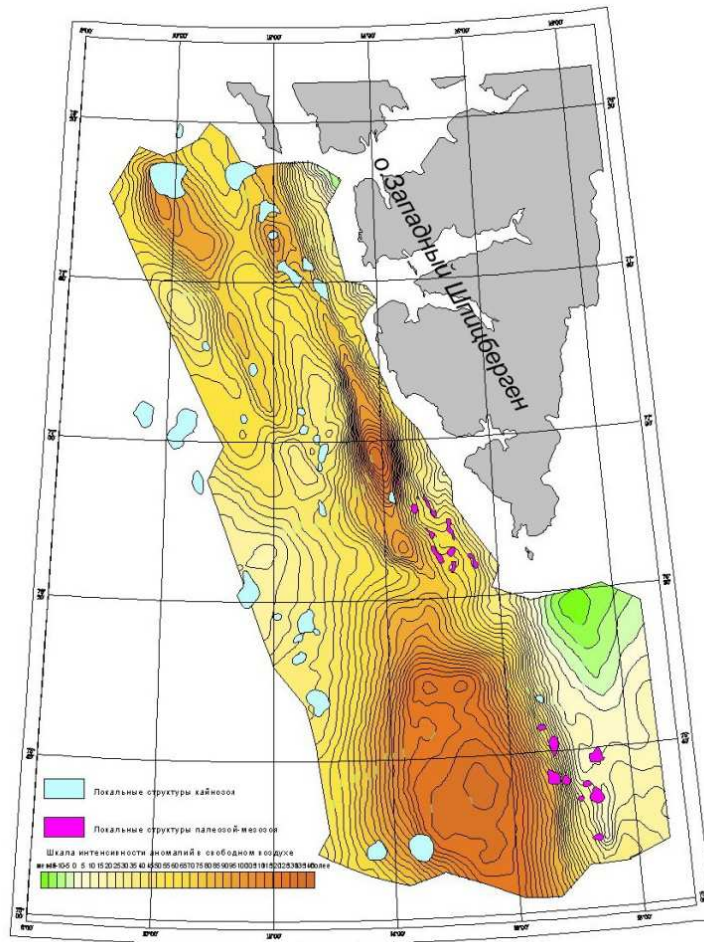


Рис. 4. Пример сопоставления выделенных ловушек УВ с гравитационной аномалией (мантийным плюмом)

Заключение

Результаты статистической обработки данных геохимических исследований показали, что эндогенная составляющая в вертикальном перемещении УВ является преобладающей по сравнению с органическим углеродом.

Данные газогидрохимических исследований подтверждают присутствие углеводородов; они пространственно группируются в локальные аномалии. Аномалии растворенных углеводородов в воде тяготеют к разломным зонам.

Данные сейсморазведки МОВ ОГТ свидетельствуют о миграции углеводородов из океанической части к поверхности как по вертикали, так и вверх по склону; они скапливаются в литологических, структурно-тектонических и стратиграфических ловушках, где претерпевают трансформацию. В приповерхностной части могут формироваться газогидраты.

Условия формирования газогидратов и газонасыщенных толщ в зоне континентальной окраины и Поморского прогиба описаны авторами в работах [10; 11]. Во всех случаях наблюдалась вертикальная миграция углеводородов вверх по разрезу и сопоставимость аномалий растворенных углеводородов на поверхности дна с аномалиями "яркое пятно" по данным сейсморазведки МОВ ОГТ, а также приуроченность к разломам, а особенно к узлам их пересечений. Эти факты свидетельствуют о единой природе формирования углеводородов традиционного и нетрадиционного типов, которые при вертикальной миграции претерпевают изменения в различных частях осадочной толщи под влиянием различных геологических факторов на протяжении геологического времени.

Авторами проведено сопоставление пространственного расположения выделенных ловушек УВ в Поморском прогибе с гравитационной аномалией, связанной с мантийным плюмом. Выделенные ловушки на различных уровнях группируются вдоль мантийного диапира. Видимо, он действительно служил как источником, так и обогревателем и способствовал трансформации углеводородных систем.

Тема дегазации Земли выходит за рамки данного исследования. Однако на основе полученных данных можно объяснить не только преобладание эндогенной составляющей углеводорода, но и приуроченность как бассейнов, так и зон флюидомиграции (подводящих каналов) к зонам тектонических нарушений.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность научному руководителю Института проблем нефти и газа РАН академику А. Н. Дмитриевскому, главному научному сотруднику ФГУНПП "Севморгео" д-ру геол.-минерал. наук М. Л. Верба и генеральному директору ОАО МАГЭ д-ру техн. наук Г. С. Казанину за поддержку и необходимые советы в процессе исследований.

Библиографический список

1. Погребитский Ю. Е., Горячев Ю. В., Трухалев А. И. Мировой океан : сб. М., 2001. Вып. 3. С. 44–48.
2. Валяев Б. М. Проблема генезиса нефтегазовых месторождений: теоретические основы и практическая значимость // Генезис углеводородных флюидов и месторождений. М. : ГЕОС, 2006. С. 14–22.
3. Красный Л. И. Восходящие глубинные и близповерхностные структуры и связанная с ними минерагения // Отеч. геология. 2000. № 6. С. 23–28.
4. Дмитриевский А. Н., Валяев Б. В. Основные результаты и перспективы исследований по проблеме "дегазация Земли" // Дегазация земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ : мат. межд. конф. памяти акад. П. Н. Кропоткина, 20–24 мая 2002 г. М. : ГЕОС, 2002. С. 3–6.
5. Павленкова Н. И. Флюидная концепция глобальной тектоники // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ : мат. межд. конф. памяти акад. П. Н. Кропоткина, 20–24 мая 2002 г. М. : ГЕОС, 2002. С. 58–60.
6. Барышев А. Н. Фрактальная структура системы плюмов, связь с ней дегазации Земли и металлогении // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ : мат. межд. конф. памяти акад. П. Н. Кропоткина, 20–24 мая 2002 г. М. : ГЕОС, 2002. С. 90–92.
7. Летников Ф. А. Геофлюиды в геологической истории Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы : мат. всерос. конф. 22–25 апр. 2008 г. М. : ГЕОС, 2008. С. 8–10.
8. Исаев Г. Д. О концепциях нефтегазообразования // Вестник ТГУ. Науки о Земле. 2009. С. 323–378.
9. Верба М. Л. Проявления природных углеводородов в осадочном чехле Шпицбергена // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. Т. 2. С. 22. URL: <http://www.ngtp.ru/rub/6/018.pdf>
10. Захаренко В. С. Потенциальный экологический риск, связанный с газогидратами на Западно-Арктической континентальной окраине // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2011. № 4. С. 21–26.
11. Захаренко В. С., Казанин Г. С., Радченко М. С. Условия образования газогидратов на Шпицбергенско-Баренцевоморской континентальной окраине // Естественные и технические науки. 2013. № 2. С. 158–163.

References

1. Pogrebitskiy Yu. E., Goryachev Yu. V., Truhalev A. I. Mirovoy okean [World Ocean]: sb. M., 2001. Vyp. 3. P. 44–48.
2. Valyaev B. M. Problema genezisa neftegazovykh mestorozhdeniy: teoreticheskie osnovy i prakticheskaya znachimost [The problem of genesis of oil and gas fields: Theoretical basis and practical significance] // Genezis uglevodorodnykh flyuidov i mestorozhdeniy. M. : GEOS, 2006. P. 14–22.
3. Krasnyi L. I. Voshodyaschie glubinnye i blizpoverhnostnye struktury i svyazannaya s nimi minerageniya [Rising depth and near surface structures and related minerageny] // Otech. geologiya. 2000. N 6. P. 23–28.
4. Dmitrievskiy A. N., Valyaev B. V. Osnovnye rezultaty i perspektivy issledovaniy po probleme "degazatsiya Zemli" [The main results and prospects of research on the problem of "degassing of the Earth"] // Degazatsiya zemli: geodinamika, geoflyuidy, neft i gaz : mat. mezhd. konf. pamyati akad. P. N. Kropotkina, 20–24 maya 2002 g. M. : GEOS, 2002. P. 3–6.
5. Pavlenkova N. I. Flyuidnaya kontseptsiya globalnoy tektoniki [The fluid concept of global tectonics] // Degazatsiya Zemli: geodinamika, geoflyuidy, neft i gaz : mat. mezhd. konf. pamyati akad. P. N. Kropotkina, 20–24 maya 2002 g. M. : GEOS, 2002. P. 58–60.
6. Baryshev A. N. Fraktalnaya struktura sistemy plyumov, svyaz s ney degazatsii Zemli i metallogenii [Fractal structure of the plumes system, its communication to the Earth degassing and metallogeny] // Degazatsiya Zemli: geodinamika, geoflyuidy, neft i gaz : mat. mezhd. konf. pamyati akad. P. N. Kropotkina, 20–24 maya 2002 g. M. : GEOS, 2002. P. 90–92.
7. Letnikov F. A. Geoflyuidy v geologicheskoy istorii Zemli [Geofluids in the Earth's geological history] // Degazatsiya Zemli: geodinamika, geoflyuidy, neft, gaz i ih paragenezы : mat. vseros. konf. 22–25 apr. 2008 g. M. : GEOS, 2008. P. 8–10.
8. Isaev G. D. O kontseptsiyah neftegazoobrazovaniya [On concepts of oil and gas developing] // Vestnik TGU. Nauki o Zemle. 2009. P. 323–378.

9. Verba M. L. Proyavleniya prirodnyh uglevodorodov v osadochnom chehle Schpitsbergena [Manifestations of natural hydrocarbons in the sedimentary cover of Spitsbergen] // Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika. 2007. V. 2. P. 22. URL: <http://www.ngtp.ru/rub/6/018.pdf>

10. Zaharenko V. S. Potentsialnyi ekologicheskiy risk, svyazannyi s gazogidratami na Zapadno-Arkticheskoy kontinentalnoy okraine [Potential environmental risks associated with gas hydrates in the Western Arctic continental margin] // Zashita okruzhayushey sredy v neftegazovom komplekse. 2011. N 4. P. 21–26.

11. Zaharenko V. S., Kazanin G. S., Radchenko M. S. Usloviya obrazovaniya gazogidratov na Shpitsbergensko-Barentsevomorskoy kontinentalnoy okraine [The conditions of formation of gas hydrates in the Spitsbergen-Barents Sea continental margin] // Estestvennye i tehnicheckie nauki. 2013. N 2. P. 158–163.

Сведения об авторах

Захаренко Валентина Степановна – Мурманский государственный технический университет, факультет арктических технологий, кафедра механики сплошных сред и морского нефтегазового дела, канд. геогр. наук, доцент; e-mail: veronica@polarcom.ru

Zakharenko V. S. – Murmansk State Technical University, Faculty of Arctic Technologies, Department of Continuum Mechanics and Offshore Oil and Gas Industry, Cand. of Geogr. Sci., Associate Professor; e-mail: veronica@polarcom.ru

Радченко Марина Сергеевна – Морская арктическая геологическая экспедиция (ОАО МАГЭ), начальник геологического отряда

Radchenko M. S. – Marine Arctic Geological Expedition (MAGE), Head of Geological Unit

Шлыкова Валентина Алексеевна – Морская арктическая геологическая экспедиция (ОАО МАГЭ), канд. геол.-минерал. наук, вед. геофизик

Shlykova V. A. – Marine Arctic Geological Expedition (MAGE), Cand. of Geol. & Miner. Sci., Senior Geophysicist