

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ГЕНЕЗИС УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ  
ЛАПТЕВО-СИБИРОМОРСКОЙ ЗОНЫ ВОСТОЧНО-АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА****А.И. Гресов, А.В. Яцук***ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43,  
г. Владивосток, 690041; E-mail: gresov@poi.dvo.ru, yatsuk@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 30 мая 2023 г.

В составе газа донных отложений Лаптево-Сибироморской зоны присутствует метан в концентрациях до 8.3047 см<sup>3</sup>/кг и его гомологи (до пентана включительно) – в сумме до 0.0259 см<sup>3</sup>/кг. Установленные значения изотопного состава углерода метана ( $\delta^{13}\text{C}$ ), молекулярной массы углеводородной фракции, весовых концентраций углеводородов ряда (C<sub>1</sub>–C<sub>5</sub>) и их отношений – коэффициентов «влажности» и «преобразованности» УВ-фракции – свидетельствуют о наличии в донных осадках сингенетических и эпигенетических газов различных газоматеринских источников – современных осадков, торфяников, угольных, газовых и газогидратных? залежей, твердых битумов, магматических образований и предполагаемых залежей нефтегазового и газонефтяного ряда. Установлено, что распределение углеводородных газов в осадках по разрезу и площади зоны зависит от комплексного влияния геологических факторов – складчатой и разрывной тектоники, магматизма и сейсмоактивности региона, углеводородности и битуминозности, органической насыщенности и литологического состава, гидрогеологических, геокриологических и других условий накопления и аккумуляции газов или их дегазации.

**Ключевые слова:** донные отложения, углеводородные газы, генезис, газонасыщенность, аномалии, геологические факторы, нефтегазоносность, Лаптево-Сибироморская зона.

**ВВЕДЕНИЕ**

Лаптево-Сибироморская зона (ЛСЗ) является трансграничной территорией моря Лаптевых (МЛ) и Восточно-Сибирского моря (ВСМ), включающей острова Новосибирского архипелага и площади шельфа указанных морей (рис. 1). Первые сведения о геологии Новосибирских островов были получены в экспедициях М.И. Геденштрома, П.Ф. Анжу, Дж. Де-Лонга, А.А. Бунге, Э.В. Толля, К.А. Воллосовича, Б.А. Вилькицкого, М.М. Ермолаева, Н.В. Пинегина и других исследователей в конце XIX – начале XX века. Начиная с пятидесятих годов прошлого столетия в регионе осуществляются геолого-съёмочные работы с изданием Государственных геологических карт РФ масштаба 1:1 000 000 (1961, 1999, 2016), сопровождаемые научными геологическими исследованиями НИИГА, ВНИИОкеанология, ОАО «Севморгеология», МАГЭ, ВСЕГЕИ, ГИН РАН и других институтов и организаций. В период 1985–2022 гг. сотрудниками ПГО «Севморгеология», Лаборатории региональной геодинамики (ЛАРГЕ), треста «Севморнефтегеофизика» и Федерального института геологии и природных

ресурсов (BGR, Германия), ОАО «Севморгеология» и МАГЭ в ЛСЗ выполнены сейсмические исследования методами КМПВ и МОВ ОГТ.

Первые сведения о составе газов и газонасыщенности донных осадков МЛ и ЛСЗ получены НИИГА в период 1975–1981 гг. В это же время ВНИГРИ, ВСЕГЕИ и НПО «Севморгеология» изучен состав газов пород и четвертичных осадков, газовой фазы подземных вод и газопроявлений по данным скважинного опробования Новосибирских островов и прилегающего шельфа. Наряду с производственными работами рассматриваемый район включался в сферу разноплановых научных газогеохимических работ ОАО «Севморгеология», МАГЭ, ВНИИОкеанология, ВСЕГЕИ, ВНИГРИ, ГИН РАН, МГУ, ИНГГ, ИПНГ РАН, ТОИ ДВО РАН, а также совместных российских, шведских, норвежских, германских и китайских исследований.

В настоящее время проведение газогеохимических исследований донных осадков в различных субаквальных осадочных бассейнах мира характеризуется неоднородным распределением. Одним из ос-

новых современных требований, предъявляемых к газогеохимическим исследованиям донных осадков, является повышение точности и эффективности прогноза наличия газоматеринских источников, а также разработка достоверных критериев разделения техногенных, биогенных и термогенных (катагенетических) источников. Немаловажным вопросом является сопоставление распределения газонасыщенных донных осадков с геолого-структурным строением осадочной толщи, позволяющее выделять районы аккумуляции и разгрузки глубинных флюидов. Опыт наших работ показывает, что в данном вопросе нужен комплексный подход в выборе критериев определения источников. Газогеохимические поля в донных осадках, как правило, имеют сложный полигенетический состав, соответственно оценка генезиса только по одному газовому компоненту или одному параметру может порой приводить к неправильным выводам.

Таким образом, основная цель работы заключается в обобщении, систематизации и сравнительном научном анализе данных газогеохимических и геологических исследований, позволяющим приблизиться к реальному пониманию природы формирования и распределения углеводородных газов (УВГ) осадков ЛСЗ в пределах сочленения Евразийской и Северо-Американской литосферных плит. Актуальность работы обусловлена использованием авторского подхода в исследовании генезиса УВГ, а также приоритетом поисковых и научно-прикладных исследований в Арктической зоне, способствующих развитию минерально-сырьевой базы Российской Федерации.

#### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Основным материалом исследований являлись донные отложения 55-ти океанографических станций (рис. 1), отобранные гидростатическими и прямооточными грунтоотборными трубками с вкладышами с длиной керна до 3.25 м, дночерпателями и мультикорами – до 0.60 м с НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (рейсы LV83, LV90), гидрографических и попутных судов Дальневосточного пароходства, а также прибрежных экспедиций различных организаций. Всего отобрано 26 колонок осадка длиной больше 1 м, 14 коротких трубок длиной до 1 метра и 22 дночерпателя и мультикора.

В процессе исследований колонки керна осадков подвергались поинтервальному опробованию с опорных горизонтов (50, 100, 150 см и т.д.) или с самого нижнего горизонта пробоотборного устройства. Всего отобрано 110 герметических сосудов с последующей их дегазацией и отбором газа при свободном и термовакуумном выделении (58 и 110 проб, соответственно). Дегазация и хроматографический анализ 168

проб газа осуществлялись в аттестованной Росстандартом лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН на хроматографах «Хроматэк-Газохром 2000» и «КристалЛюкс-4000М» в экспедиционных и стационарных условиях. Методика дегазации, хроматографического анализа газов и определения газонасыщенности осадков соответствовала действующему нормативному методическому руководству\*, ГОСТ 23781-87\*\* и 31371.3-2009\*\*\*.

Для изучения состава газа пород и четвертичных осадков, газопроявлений и газовой фазы подземных вод использованы материалы скважинного газового опробования керна литотипов, проб свободного газа и газовой фазы подземных вод [4, 9, 14]. Установленные значения геохимических показателей УВГ литотипов, залежей свободного и растворенного газа [6, 7, 9] применялись при идентификации газоматеринских источников. Данные масс-спектрометрии изотопных отношений (IRMS)  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  лабораторий стабильных изотопов ВСЕГЕИ и ДВГИ ДВО РАН, а также материалы [4, 8, 9, 19] использовались в процессе определения генезиса УВГ донных отложений. Определение содержания органического углерода ( $\text{C}_{\text{орг}}$ ) выполнялось методом ИК-детектирования на анализаторе ТОС-V (Shimadzu) в аккредитованной лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН.

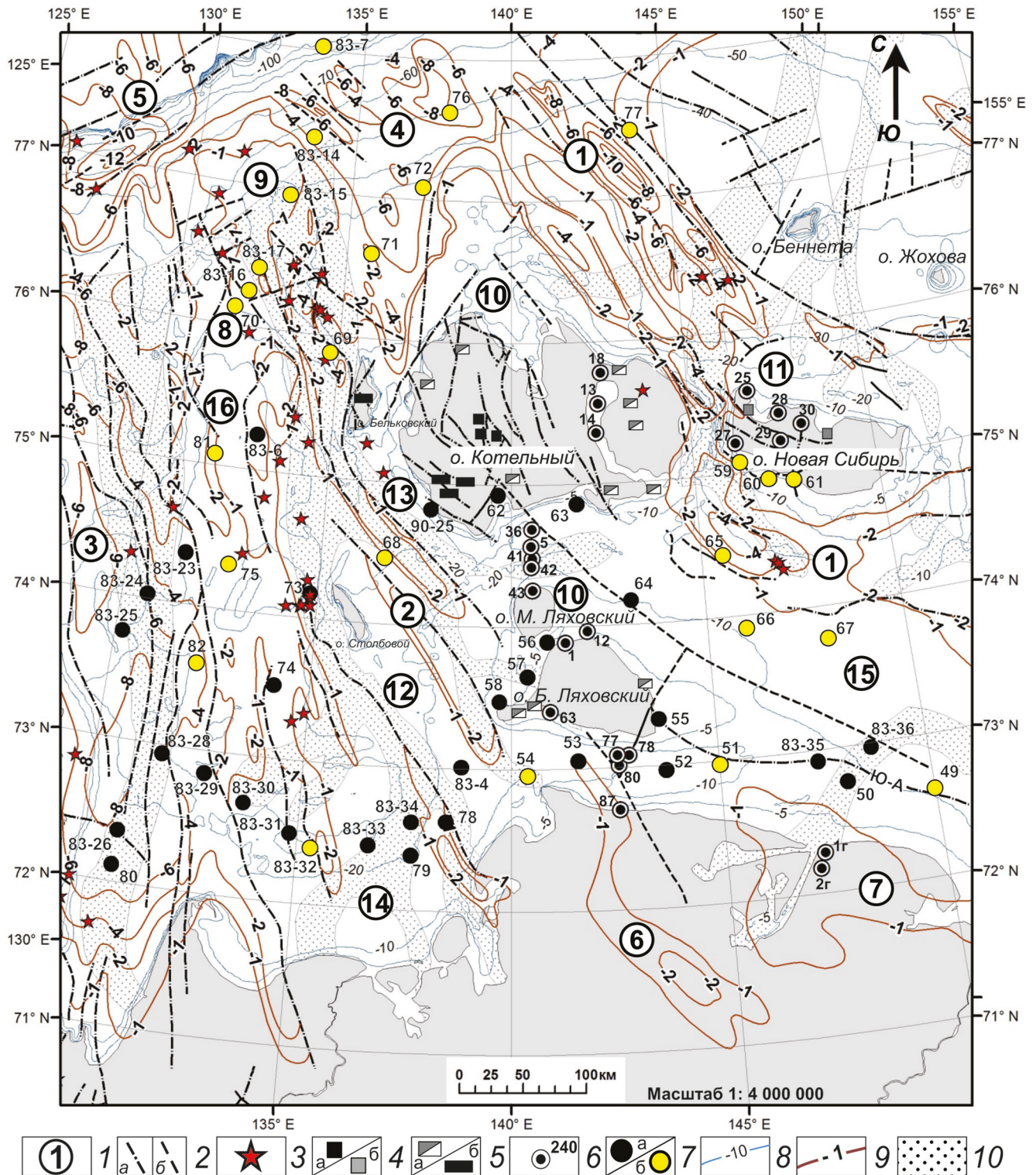
В качестве основного метода определения происхождения УВГ осадков, помимо изотопных исследований, использовался комплексный метод расчета количественных газогеохимических показателей – молекулярной массы УВ-фракции ( $M_{\text{УВ}}$ ), весовых концентраций УВГ ( $\text{C}_1-\text{C}_5$ ), нормированных по отношению к  $M_{\text{УВ}}$  в долях целого на 1000 (или в граммах на килограмм газа УВ-фракции) [1] и их отношений – коэффициентов «преобразованности» ( $K_{\text{пр}}$ ) [2] и «влажности» УВ-фракции ( $K_{\text{вл}}$ ) [16]. Коэффициенты  $K_{\text{пр}}$  и  $K_{\text{вл}}$  представлены выражениями:  $K_{\text{пр}} = (\text{C}_2 \times \text{C}_4) / \text{C}_3$  и  $K_{\text{вл}} = \Sigma \text{C}_2-\text{C}_5 / \Sigma \text{C}_1-\text{C}_5 \times 100$  (%), где  $\text{C}_1-\text{C}_5$  – весовые концентрации УВ в долях на 1000. Установлено, что значения  $K_{\text{пр}}$  достаточно тесно связаны с возрастом коллектора УВГ и свидетельствуют о продолжительности нахождения газа в ловушке [2, 6, 7];  $K_{\text{вл}}$  – о степени обогащенности УВ-фракции суммой гомологов метана [8, 9].

\* Руководство по определению и прогнозу газонасыщенности вмещающих пород при геологоразведочных работах. Ростов-на-Дону: ВНИИГРИуголь. 1985. 96 с.

\*\* Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава. М., Госстандарт, 1987, 14 с.

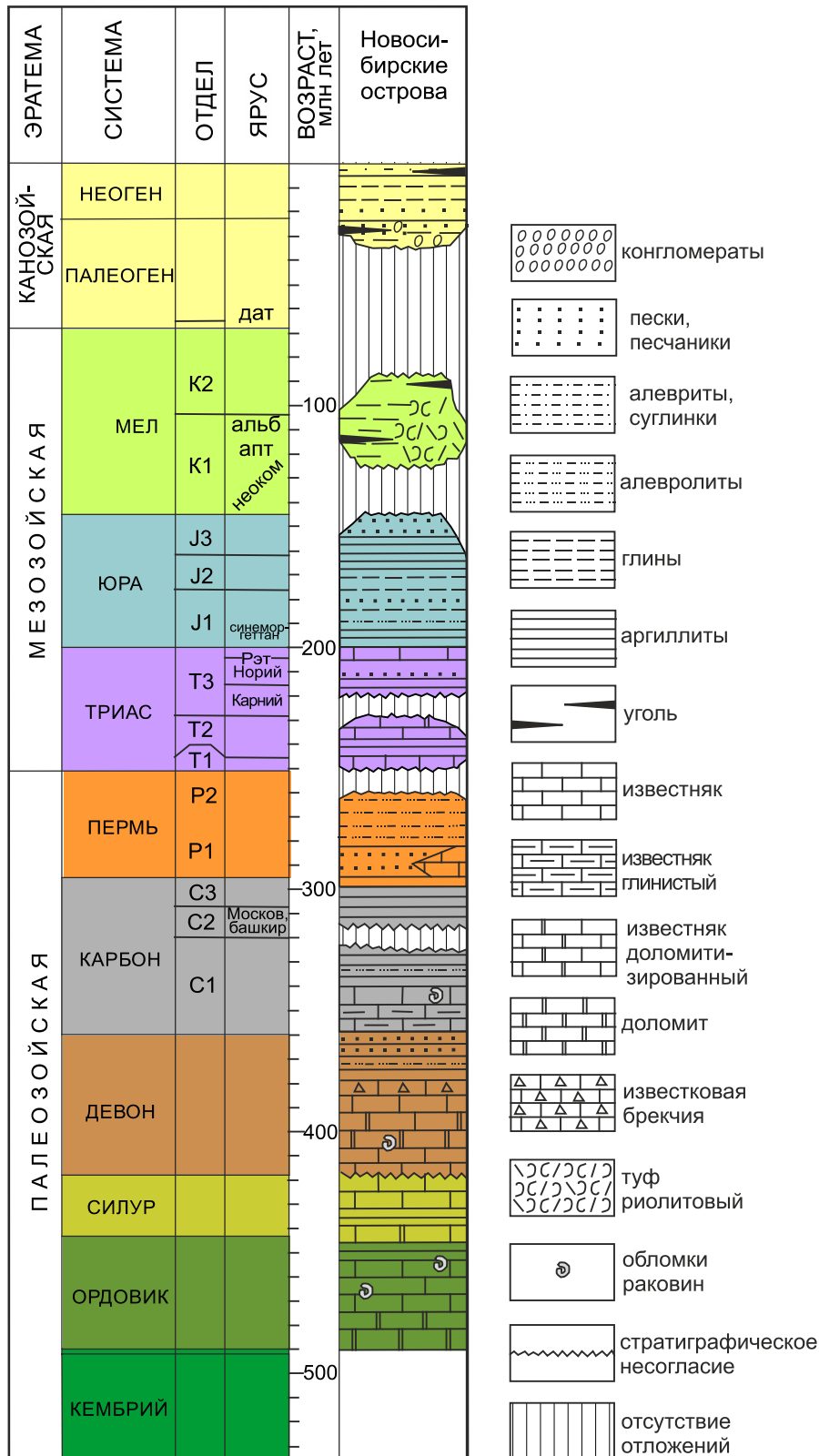
\*\*\* Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. М., Стандартинформ, 2009, 16 с..





**Рис. 1.** Геоструктурная карта района исследований [3–5] и литолого-стратиграфическая колонка Новосибирских островов [12].

*l* – геоструктуры I порядка: прогибы (осадочные бассейны): 1 – Новосибирский, 2 – Бельковско-Святоносский, 3 – Омолойский, 4 – Анисинский, 5 – Северо-Лаптевский, 6 – Тастахский, 7 – Приморский, 8 – Северо-Омолойский грабен-рифт; поднятия: 9 – Восточно-Лаптевское, 10 – Котельническое, 11 – Решетниковское; горсты: 12 – Столбовской, 13 – Бельковский; структурные террасы: 14 – Шелонская, 15 – Благовещенская, 16 – Санниковская седловина;



Ю-А – Южно-Аннуйская сутура; 2 – разломы и нарушения: установленные (а), предполагаемые (б); 3 – эпицентры землетрясений; 4 – угольные месторождения: каменного угля (а), бурого угля (б); 5 – углепроявления (а), битумопроявления (б); 6 – скважины газового опробования, 7 – океанографические станции и их номера: глубина опробования донных отложений < 1 м (а), > 1 м (б); 8 – изобаты, м; 9 – изогипсы поверхности гетерогенного фундамента, км; 10 – палеодолины рек.



Оцифровка и пространственно-математическая интерпретация результатов исследований производилась в программном комплексе ESRI®ArcGIS с помощью модуля Geostatistical Analyst по методу обратных взвешенных расстояний (IDW).

#### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В связи с отсутствием глубоких скважин, геологическая характеристика ЛСЗ базируется на материалах геологических съемок Новосибирского островного архипелага, сейсморазведочных работ МОВ ОГТ ОАО «Севморгеология», МАГЭ и данных бурения мелких скважин, грунтоотборных трубок в верхней части разреза.

#### Стратиграфия и литология

В *палеозойских* отложениях ЛСЗ выделяются *кембрий-силурийский*, *девон-нижнекаменноугольный* и *среднекаменноугольный-пермский* карбонатные и терригенно-карбонатные породные комплексы, установленные в обнажениях о-вов Беннетта, Котельный и Бельковский. *Мезозойские* образования представлены *триас-среднеюрским* терригенно-карбонатным и *верхнеюрско-барремским* терригенным комплексами; последний – соответствует фазе активного рифтогенеза и характеризуется ступенчатым характером изменения мощностей осадочных и вулканогенных пород, контролируемых разломами. *Меловой* комплекс сложен осадочными и вулканогенными породами, вскрытыми скважинами на Новосибирских островах и в акваториальной части района исследований [3, 4]. Литологический состав палеозой-мезозойских комплексов представлен на рис. 1.

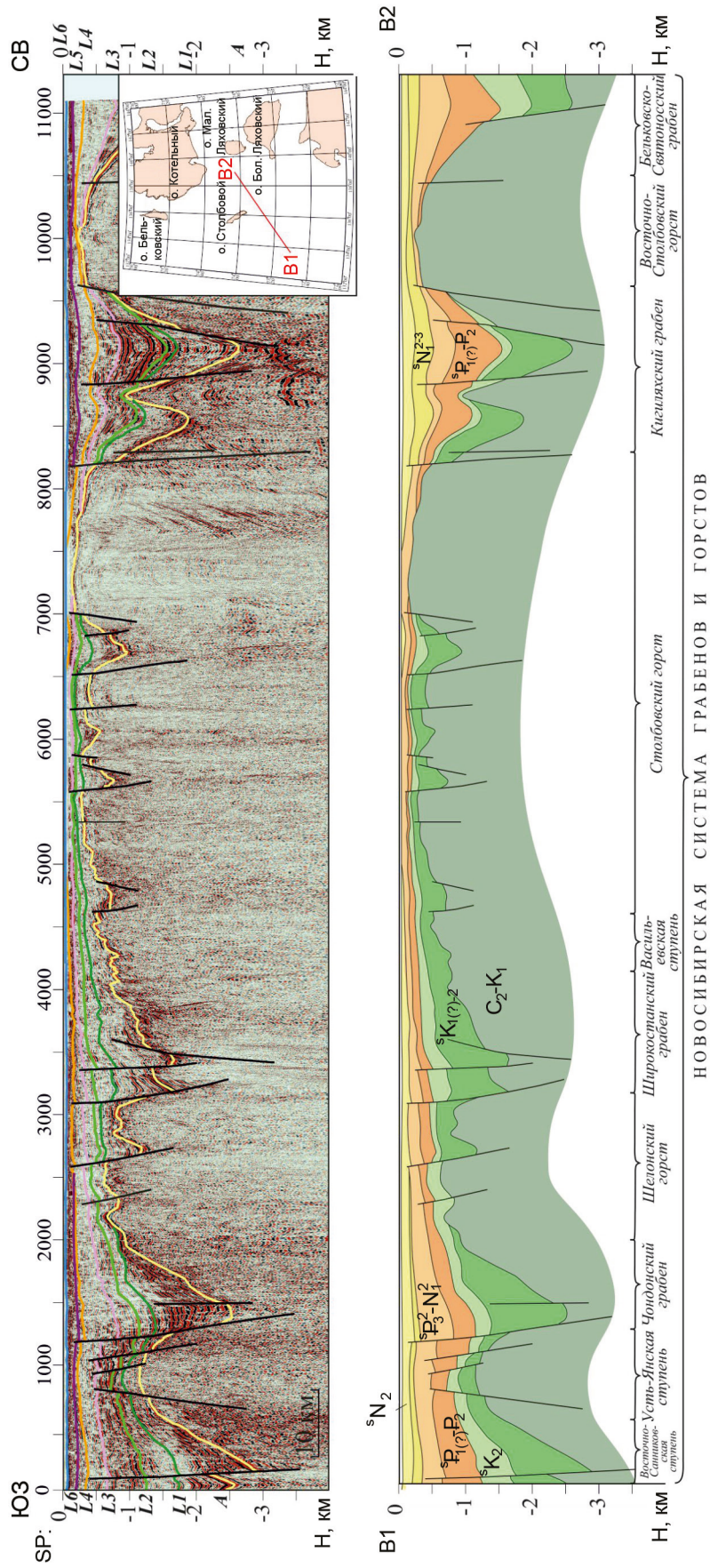
К осадочному чехлу шельфа ЛСЗ относятся *апт-верхнемеловые*, *палеогеновые*, *неогеновые* отложения и *четвертичные* осадки, образующие в районе исследований верхний (бассейновый) комплекс. По результатам интерпретации геолого-геофизических работ в южной части ЛСЗ выделяются три сейсмокомплекса (рис. 2): *нижне-верхнемеловой* – между отражающими горизонтами (ОГ) А и L2, *палеоцен-среднемиоценовый* – L2 и L4 и *среднемиоцен-плейстоценовый* – L4 и L6 (дном моря). Отложения комплекса (по данным буровых работ на шельфе) представлены корой выветривания, галечниками, песками, алевритами, глинами, линзами и пластами бурого угля и торфа, гравелитами, песками, алевритами и илами. [3, 4, 9]. *Четвертичные* осадки района исследований представлены в основном терригенными образованиями, сложенными песками, илами, алевритами и галечниками голоцен-плейстоценового возраста [3, 4, 10].

#### Тектоника и магматизм

Рассматриваемая территория расположена в пределах трансграничной зоны МЛ и ВСМ, в том числе сочленения Евро-Азиатской и Североамериканской литосферных плит. Глобальный раздвиг арктического сегмента Земли выражен Лаптевоморской грабен-рифтовой системой, базальтовым магматизмом, и цепочками эпицентров землетрясений магнитудой до 7 баллов на глубинах 4–36 км. Среди структур, характеризующих раздвиг земной коры, выделяются Котельнический и Ляховско-Святоносский жесткие блоки (Котельнический срединный массив) [3, 4]. В тектонической структуре района исследований также выделяются Решетниковское, Восточно-Лаптевское поднятия, Столбовской и Бельковский горсты, Бельковско-Святоносский, Новосибирский, Омолойский, Анисинский, Тастахский и Приморский прогибы, Северо-Омолыйский грабен-рифт, Санниковская седловина, Благовещенская и Шелонская структурные террасы, сформированные в пределах Верхояно-Колымской и Новосибирско-Чукотской складчатых областей. Последнюю с юга ограничивает Южно-Аннуйская сутура, являющаяся северо-западным окончанием Раучано-Олойской складчато-надвиговой системы. Территория ЛСЗ является частью эпипозднекембрийской платформы, в строении которой выделяется позднемеловой-кайнозойский плитный чехол, повсеместно развитый на морских акваториях.

Важной особенностью ЛСЗ является интенсивная нарушенность складчатого фундамента и плитного чехла (рис. 1, 2). По отношению к складчатости в районе выделяются продольные, диагональные и поперечные разломы. Продольные разломы, судя по структурно-фациальной зональности палеозойских отложений этого же простирания, являются конседиментационными, заложенными в палеозое. Заложение диагональных и поперечных разломов относится к мелу-кайнозою. Движения по всем разломам, судя по геоморфологическим, газогеохимическим и сейсмическим данным, продолжаются и в настоящее время.

Магматические образования района представлены породами от ультрабазитов до гранитов. В распределении интрузивных образований намечаются достаточно четкие возрастные и структурно-тектонические закономерности. Среднепозднепалеозойские дайки, силы долеритов и габбродолеритов приурочены к Котельническому поднятию. Раннемезозойские (?) ультрабазиты характерны для Южно-Аннуйской шовной зоны. Раннемеловые гранитоиды образуют поперечный ряд, связанный с субмеридиональной зоной тектономагматической активизации (ТМА). Позднемеловой магматизм представлен дайками основного состава [3, 4, 13, 17].



**Рис. 2.** Сейсмогеологический разрез (B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>) южной части района исследований [4]. L1-L6 – отражающие горизонты (ОГ), А – акустический фундамент. На врезке: схема расположения разреза.

**Органическая насыщенность** литотипов района исследований достаточно высокая. В меловых-кайнозойских отложениях установлены углистые алевролиты и аргиллиты, пласты каменных и бурых углей, лигнитов и торфов, в палеозой-мезозойских – твердые битумы, углистые сланцы, алевролиты и аргиллиты.

Битумопроявления о-вов Котельный и Бельковский (рис. 1) характеризуются возрастным диапазоном от ордовика до мела. Образование битумов относится к нескольким фазам его генерации и представляет собой продукт сложного преобразования под совокупным воздействием метаморфогенных и гипергенных факторов. Среди них присутствуют битумы различных классов: от мальт до антраксолитов, сформировавшиеся по метаморфогенной линии преобразования и до асфальтитов и гуминокеритов – под воздействием гипергенных факторов. В изученном районе преобладают смолистые битумоиды с содержанием масел около 50 % и содержанием асфальтенов 2–5 % [3, 4, 11].

На о-вах Котельный и Беннета установлено от 2-ух до 9-ти нижнемеловых пластов каменного угля мощностью от 1 до 25 м стадии катагенеза МК<sub>1</sub>. В отложениях верхнего мела, эоцена, олигоцена и миоцена о-вов Котельный, Фадеевский, Новая Сибирь установлено до 10-ти пластов бурого угля стадий катагенеза ПК<sub>1,2</sub> мощностью 1–12 м. На о-ве Бол. Ляховский, Тастахской и Приморской угленосных площадях установлено несколько десятков пропластков и пластов бурого угля мощностью 0.1–2.4 м. В верхних частях разреза установлены линзы и слои торфов мощностью до 2 м, а также миоцен-четвертичных глин с содержанием  $C_{орг}$  – 9–12 %. Кроме того, среди изученных литотипов пород выделяются слои пермско-триасовых, юрско-меловых и палеоген-неогеновых углистых сланцев, аргиллитов и глин с содержанием  $C_{орг}$  – 19–42 % и мощностью от 1 до 38 м [3, 4].

### Газоносность

В пределах района исследований установлены газопроявления и выбросы газа\* из скважин 1г, 2г, 6\*, 13, 14, 41, 87\* (рис. 1) на глубинах 36–112 м с содержанием метана и суммы его гомологов – 10.24–94.72 и 0.00001–0.76 %, соответственно. Концентрации  $CH_4$  и  $\Sigma C_2-C_5$  в четвертичных осадках по данным газового опробования керна скважин 1, 5, 12, 18, 25, 27–30, 32, 80 достигают 1.89 и 0.002 см<sup>3</sup>/кг, эффузивных породах – 2.81 и 0.032, торфяниках – 5.56 и 0.045, лигнитах – 177.30 и 2.140, бурых углях – 780.72 и 8.650, каменных – 2000.84 и 23.361 см<sup>3</sup>/кг в интервале глубин от поверхности до 10–124 м. Содержание метана и  $\Sigma C_2-C_5$  в газовой фазе подземных вод в скважинах 41, 42, 43, 63, 77, 78 составляет 0.04–51.70 и

0.00001–0.010 %, при общей газонасыщенности вод 24–70 см<sup>3</sup>/л [3, 4, 8, 9].

Формирование и распределение УВГ в осадках ЛСЗ обусловлено влиянием **гидро-геокриологических условий** Яно-Индибирского криогенного артезианского бассейна, Котельническо-Ляховской гидрогеологической области и артезианских бассейнов МЛ и ВСМ, гидрогеологический режим которых обусловлен их положением в зоне многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность ММП Новосибирских о-вов, по данным ВЭЗ и бурения, составляет 450–500 м, прибрежной зоны – 50–120 м. Установлено, что основное влияние на распределение УВГ в донных осадках оказывают пластовые скопления подземных вод позднемеловых-кайнозойских отложений, газонасыщенность которых достигает 70 см<sup>3</sup>/л. Температуры донных осадков ЛСЗ изменяются от -1.8 до +1.9°C [3, 4, 18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Состав и генезис газов

В составе УВГ донных отложений ЛСЗ установлены: метан с содержанием 0.0006–2.9760 %, этан и этилен (суммарно) – 0.00001–0.00754, пропан и пропилен – 0–0.00149, n-бутан и i-бутан – 0–0.00132, n-пентан и i-пентан – 0–0.00011 %. Интерпретация значений геохимических показателей УВГ позволила выделить в осадках ЛСЗ одиннадцать генетических групп газов различных литотипов и газоматеринских источников, характеризующихся различным изотопным составом  $\delta^{13}C-CH_4$  (табл. 1).

Исходя из значений изотопно-геохимических показателей (табл. 1), *сингенетические* УВГ современных осадков характеризуются метановым составом с микропримесью этана и этилена, низкими средними значениями  $\delta^{13}C-CH_4$  (-74.5‰), Кпр (0.3), Квл (0.2 %) и биохимическим происхождением. Присутствие «следов» пропана в осадках связано, по-видимому, с процессами их природной диффузии и миграции из подстилающих их отложений. Аналогичные геохимические показатели УВГ установлены авторами [9] в четвертичных отложениях скважин 5, 13, 14, 25, 27–30, 32, 34, 41, 63 (рис. 1).

Для *эпигенетических* УВГ торфяников характерно доминирование биогенной составляющей ( $\delta^{13}C-CH_4$ : -78.0...-69.0 ‰,  $M_{ув}$  – 16.12–16.13 г/моль, Квл менее 1 %, Кпр ≤ 2) с микропримесью пропана и следов i-бутана. Аналогичные показатели установлены в слоях торфов скважин 1 и 12 на мелководье о-ва Бол. Ляховский [9]. Данное положение относится и к УВГ потенциально газогидратных образований ЛСЗ, средние газогеохимические показатели которых  $M_{ув}$  –



Таблица 1. Средние значения изотопно-геохимических показателей генетических групп УВГ донных отложений района исследований.

Группа, литотип, источник газа (номера донных станций)	$\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ , ‰	Весовые концентрации в долях целого на 1000					$M_{\text{УВ}}$ , г/моль	Коэффициенты	
		$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$		Кпр	Квл, %
1. Современные осадки (57, 62, 64)	-74.5	997	2	сл.	0	0	16.05	0.3	0.2
2. Газогидраты (70, 83-7, 83-14, 83-16)	н.о.	993	4	2	сл.	0	16.09	0.9	0.7
3. Торфяники (55, 59)	-69.8	991	7	1	сл.	0	16.13	2.0	0.9
4. Угольные залежи									
4.1. бурые угли (58, 60, 63, 66, 80, 83-28)	-61.0	980	16	3	1	0	16.20	4.7	2.0
4.2. каменные угли (49, 51, 53, 83-34)	-58.6	973	19	6	2	сл.	16.27	8.1	2.7
5. Газовые залежи									
5.1. кайнозойские (61, 78)	н.о.	987	11	2	сл.	0	16.15	2.5	1.4
5.2. мезозойские* (74, 83-30, 83-32)	-56.0	954	34	10	2	1	16.42	9.4	4.6
6. Магматические породы (52, 56, 71, 83-15, 83-17, 83-24, 90-25)	н.о.	927	54	15	4	0	16.68	16	7.3
7. Конденсатногазовые залежи* (67, 79, 81, 83-4, 83-25, 83-26, 83-29, 83-31)	-53.0	875	81	40	4	0	17.15	28	12.5
8. Твердые битумы (50, 54, 69, 73, 83-6, 83-23, 83-35, 83-36)	-49.8	840	94	41	20	5	17.61	46	16.0
9. Конденсатные залежи*(68, 75, 82)	-50.4	766	155	52	24	3	18.29	63	23.4
10. Нефтегазовые залежи*(65, 77)	н.о.	682	180	71	61	5	19.43	153	31.8
11. Газонефтяные залежи* (72, 76)	-44.8	528	287	84	89	11	21.60	304	47.2

Примечание. \* – предполагаемые залежи, сл. – «следы», н.о. – не определялся.

16.09 г/моль, Кпр – 0.9 и Квл – 0.7 достаточно близки к аналогичным показателям плейстоцен-миоценовых осадков скважины 18 залива Геденштрома [9], а также газогидратов впадины Дерюгина Охотоморского осадочного бассейна и Мессояхского газового месторождения (табл. 2).

В миграционных УВГ кайнозойских газовых и буроугольных залежей наблюдается паритетное распределение УВГ биохимического и метаморфического генезиса, на что указывают весовые концентрации УВ и средние значения показателей  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ ,  $M_{\text{УВ}}$ , Квл, Кпр: -61.0 и -60.9 ‰, 16.15 и 16.20 г/моль, 1.4 и 2.0 %, 2.5 и 4.7 (табл. 1). Аналогичные газогеохимические показатели установлены в пластах бурых углей (ПК<sub>1,2</sub>) и газопроявлений скважин 1г и 87 в устье р. Хромы и пролива Дмитрия Лаптева [9].

Эпигенетические УВГ мезозойских газовых и угольных залежей характеризуются средними значениями показателей  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  (-58.6 и -56.0 ‰),  $M_{\text{УВ}}$ , Квл и Кпр – 16.27 и 16.42 г/моль, 2.7 и 4.6%, 8.1 и 9.4, что указывает на метаморфическую природу их образования. Данное положение относится и к миграционным УВГ твердых битумов, средние изотопно-геохимические показатели которых –  $M_{\text{УВ}}$  – 17.61 г/моль, Кпр – 46, Квл – 16 % и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  (-49.6 ‰) – достаточно близки к аналогичным показателям опробованных

антраксолитов в скважине 23г на побережье Чаунской губы [8, 9].

Миграционные УВГ предполагаемых конденсатногазовых и конденсатных залежей характеризуются средними значениями показателей  $M_{\text{УВ}}$ , Квл, Кпр – 17.15 и 18.29 г/моль, 12.5 и 23.4 %, 28–63 и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  (-53.0 и -50.4 ‰), что указывает на их метаморфогенное образование. Средние значения  $M_{\text{УВ}}$ , Квл, Кпр предполагаемых нефтегазовых и газонефтяных залежей составляют 19.43 и 21.60 г/моль, 32–47 %, 153–304 и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  (-44.8 ‰). Эпигенетические УВГ магматических образований, представленные средними показателями  $M_{\text{УВ}}$ , Квл и Кпр – 16.68 г/моль, 7.3 % и 16, характеризуются магматоогенной природой образования и значениями  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  от -27.5 до -25.4 ‰ в ВСМ, по данным [8, 9].

В целом, формирование состава и концентраций УВГ донных отложений ЛСЗ подчиняется правилам аддитивности, т. е. последовательного накопления в осадках УВГ различного генезиса с преобладанием газовой фазы и геохимических показателей более газонасыщенного сингенетического или эпигенетического газоматеринского источника.

Установленные значения минимальных, максимальных и средних концентраций УВГ в донных осадках ЛСЗ на участках развития различных газо-

Таблица 2. Средние значения геохимических показателей УВГ нефтегазоносных бассейнов Востока России [6, 7].

Осадочный бассейн, месторождение (количество определений)	Весовые концентрации в долях целого на 1000					M <sub>ув.</sub> г/моль	Коэффициенты	
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>		K <sub>пр</sub>	K <sub>вл</sub>
Газогидратные залежи								
Охотоморский (24)	994	3	2	1	0	16.10	1.5	0.6
Мессояхское (8)	993	4	2	1	0	16.10	1.6	0.7
Газовые залежи								
Лено-Виллойский (48)	956	29	9	5	1	16.43	16.1	4.4
Верхне-Буреинский (5)	955	28	9	6	2	16.45	18.7	4.5
Анадырский (20)	983	10	3	3	1	16.20	10.0	1.7
Сахалинский (40)	983	9	4	3	1	16.19	6.8	1.7
Газоконденсатные залежи								
Лено-Виллойский (24)	876	69	32	16	7	17.23	34.0	12.4
Сахалинский (8)	872	68	31	17	12	17.30	37.3	12.7
Конденсатные залежи								
Лено-Виллойский (15)	786	107	59	33	15	18.30	59.8	21.4
Сахалинский (6)	831	66	40	31	32	17.89	51.2	16.9
Нефтегазовые залежи								
Лено-Виллойский (20)	728	144	74	36	18	18.97	70.0	27.2
Сахалинский (18)	764	128	67	26	15	18.50	49.7	23.6
Газонефтяные залежи								
Лено-Виллойский (32)	505	149	166	130	50	23.19	116.7	49.5
Верхне-Буреинский (28)	516	142	153	121	68	23.02	112.3	48.4
Нефтяные залежи								
Лено-Виллойский (8)	372	184	227	156	61	26.35	126.5	62.8
Верхне-Буреинский (8)	393	158	178	147	124	26.26	130.5	60.7

Таблица 3. Концентрации УВГ в донных осадках на участках развития различных газоматеринских источников (см<sup>3</sup>/кг).

Литотип, газоматеринский источник	CH <sub>4</sub> (C <sub>1</sub> )			ΣC <sub>2</sub> -C <sub>5</sub>		
	мин.	макс.	среднее	мин.	макс.	среднее
Современные осадки	0.0180	0.0654	0.0347	0.00003	0.00004	0.00003
Газогидраты	0.0066	<b>8.3047</b>	<b>2.4144</b>	0.00006	0.00682	0.00238
Торфяники	0.0305	0.1058	0.0681	0.00024	0.00139	0.00081
Угольные залежи	0.0018	<b>0.6900</b>	<b>0.3143</b>	0.00004	0.00899	0.00391
Газовые залежи	0.0086	0.0637	0.0293	0.00010	0.00115	0.00048
Магматические образования	0.0037	0.0210	0.0078	0.00018	0.00060	0.00028
Твердые битумы	0.0030	0.3620	0.0599	0.00027	0.00424	0.00137
Конденсатногазовые залежи*	0.0022	0.1549	0.0318	0.00021	0.01019	0.00208
Конденсатные залежи*	0.0243	0.1524	0.0773	0.00375	<b>0.02313</b>	<b>0.01165</b>
Нефтегазовые залежи*	0.0083	0.0923	0.0509	0.00190	<b>0.01849</b>	<b>0.01020</b>
Газонефтяные залежи*	0.0358	0.0570	0.0464	0.01396	<b>0.02596</b>	<b>0.01996</b>

Примечание. \* – предполагаемые залежи. Жирным шрифтом выделены наиболее максимальные концентрации УВГ.

материнских источников в ряде случаев превышают аномальные показатели CH<sub>4</sub> и ΣC<sub>2</sub>-C<sub>5</sub> – 0.05 и 0.001 см<sup>3</sup>/кг, установленные для осадков Восточноарктических морей [15].

Максимальными средними концентрациями CH<sub>4</sub> на площади ЛСЗ характеризуются донные осадки на участках потенциального развития газогидратных залежей и угленосных формаций (табл. 3).

Минимальные значения CH<sub>4</sub> характерны для магматических образований, газовых залежей, современных осадков и предполагаемых конденсатногазовых залежей, промежуточные – остальные газоматеринские источники.

Максимум средних концентраций ΣC<sub>2</sub>-C<sub>5</sub> в осадках наблюдается на участках распространения предполагаемых залежей нефтяного ряда и конденсата,

Таблица 4. Концентрации УВГ в донных осадках геоструктур района исследований.

Геоструктуры	CH <sub>4</sub> , см <sup>3</sup> /кг			ΣC <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> , см <sup>3</sup> /кг		
	мин.	макс.	среднее	мин.	макс.	среднее
<b>Структурные террасы (26)</b>	0.0017	<b>0.6723</b>	<b>0.0613</b>	0.00001	<b>0.00825</b>	<b>0.00132</b>
Благовещенская (10)	0.0034	<b>0.6723</b>	<b>0.1330</b>	0.00001	<b>0.00825</b>	<b>0.00200</b>
Шелонская (16)	0.0017	<b>0.0553</b>	0.0165	0.00004	<b>0.00806</b>	0.00090
<b>Поднятия, горсты (17)</b>	0.0022	<b>0.6275</b>	<b>0.1036</b>	0.00003	<b>0.00644</b>	<b>0.00126</b>
Решетниковское (2)	<b>0.0637</b>	<b>0.6275</b>	<b>0.3456</b>	0.00005	<b>0.00644</b>	<b>0.00348</b>
Котельническое (9)	0.0048	<b>0.4580</b>	<b>0.1158</b>	0.00003	<b>0.00424</b>	<b>0.00145</b>
Восточно-Лаптевское (3)	0.0022	0.0055	0.0036	0.00011	0.00019	0.00015
Бельковский, Столбовской (3)	0.0025	0.0080	0.0058	0.00008	0.00062	0.00031
<b>Прогибы, грабен-рифт (61)</b>	0.0022	<b>8.3047</b>	<b>0.2488</b>	0.00003	<b>0.02593</b>	<b>0.00271</b>
Новосибирский (7)	0.0050	<b>0.1058</b>	0.0349	0.00006	<b>0.01849</b>	<b>0.00320</b>
Анисимовский (18)	0.0024	<b>0.0659</b>	0.0172	0.00003	<b>0.02593</b>	<b>0.00168</b>
Бельковско-Святоносский (9)	0.0068	<b>0.3620</b>	<b>0.0552</b>	0.00016	<b>0.00424</b>	<b>0.00194</b>
Омолойский (11)	0.0029	<b>0.1524</b>	0.0337	0.00004	<b>0.02313</b>	<b>0.00354</b>
Тастахский (2)	<b>0.2302</b>	<b>0.6900</b>	<b>0.4601</b>	<b>0.00299</b>	<b>0.00899</b>	<b>0.00599</b>
Северо-Омолойский (14)	0.0022	<b>8.3047</b>	<b>0.9677</b>	0.00007	<b>0.01966</b>	<b>0.00307</b>
<b>Санниковская седловина (6)</b>	0.0030	<b>0.1549</b>	<b>0.0641</b>	0.00005	<b>0.01019</b>	<b>0.00486</b>
<b>Район исследований (110)</b>	0.0017	<b>8.3047</b>	<b>0.1690</b>	0.00001	<b>0.02593</b>	<b>0.00218</b>

Примечание. Жирным шрифтом выделены аномальные концентрации УВГ, в скобах – число проб.

минимум – современных осадков, магматических образований, газовых залежей и торфяников. Промежуточными значениями характеризуются донные отложения на участках развития твердых битумов, газогидратов, предполагаемых конденсатногазовых залежей и угленосных формаций.

Установлено, что концентрации метана и суммы его гомологов в донных осадках района исследований изменяются в пределах 0.0017–8.3047 и 0.00001–0.02593 см<sup>3</sup>/кг и в среднем составляют 0.1690 и 0.00218 см<sup>3</sup>/кг, что в 3.4 и 2.2 раза превышают значения аномальных показателей. При этом распределение их концентраций в синклинальных, антиклинальных и моноклинальных структурах района исследований характеризуется существенными различиями (табл. 4).

Максимальные средние концентрации CH<sub>4</sub> наблюдаются в донных отложениях синклинальных складок (прогибах и грабен-рифте), минимальные – моноклинальных (структурных террас) и седловины, промежуточные – антиклинальных (поднятий, горстов). Средние концентрации ΣC<sub>2</sub>-C<sub>5</sub> в осадках прогибов и седловины в 2–3.5 раза выше аналогичных значений поднятий, горстов и структурных террас (рис. 3, а, б; табл. 4).

Характер распределения аномалий УВГ осадков ЛСЗ зависит от геоструктурного положения. Аномальные концентрации CH<sub>4</sub> и ΣC<sub>2</sub>-C<sub>5</sub> установлены в осадках восточного (до 0.5378 и 0.00647 см<sup>3</sup>/кг), западного крыла (до 0.4580 и 0.00362 см<sup>3</sup>/кг) и сводовой части Котельнического поднятия (до 0.0615 и

0.00403 см<sup>3</sup>/кг). Аномалии CH<sub>4</sub> и ΣC<sub>2</sub>-C<sub>5</sub> в осадках юго-западного крыла Решетниковского поднятия достигают 0.6275 и 0.00644 см<sup>3</sup>/кг. Формирование аномалий метана и суммы его гомологов 0.1549 и 0.01019 см<sup>3</sup>/кг в осадках Санниковской седловины наблюдаются в центральной её части.

Низкие концентрации CH<sub>4</sub>, ΣC<sub>2</sub>-C<sub>5</sub> и отсутствие их аномалий в осадках Восточно-Лаптевского поднятия и горстов (табл. 4) указывают, вероятно, на доминирование процессов дегазации в этих структурах, однако низкая степень газового опробования этих геоструктур не позволяет сделать в настоящее время однозначные выводы.

Распределение в осадках Шелонской и Благовещенской террас аномалий метана 0.0507 и 0.5378–0.6723 см<sup>3</sup>/кг, суммы его гомологов – 0.00115–0.00806 и 0.00100–0.00825 см<sup>3</sup>/кг (рис. 3, а, б) связано с миграцией УВГ по зонам диагональных и поперечных простирацию пород разломов, транзитно секущих мезозойские газовые и углегазоносные формации, в том числе Южно-Анжуйской сутуры.

Максимальные аномальные концентрации CH<sub>4</sub> – 2.3056–8.3047 см<sup>3</sup>/кг – и аномалии ΣC<sub>2</sub>-C<sub>5</sub> – до 0.00682 см<sup>3</sup>/кг – установлены на западном крыле Северо-Омолойского грабен-рифта в зоне сочленения Евразийской и Северо-Американской литосферных плит в пределах речной палеодолины на участках максимальной мощности четвертичных осадков.

Формирование аномалий CH<sub>4</sub> и ΣC<sub>2</sub>-C<sub>5</sub> – 0.6904 и 0.00899 см<sup>3</sup>/кг наблюдается в донных отложениях



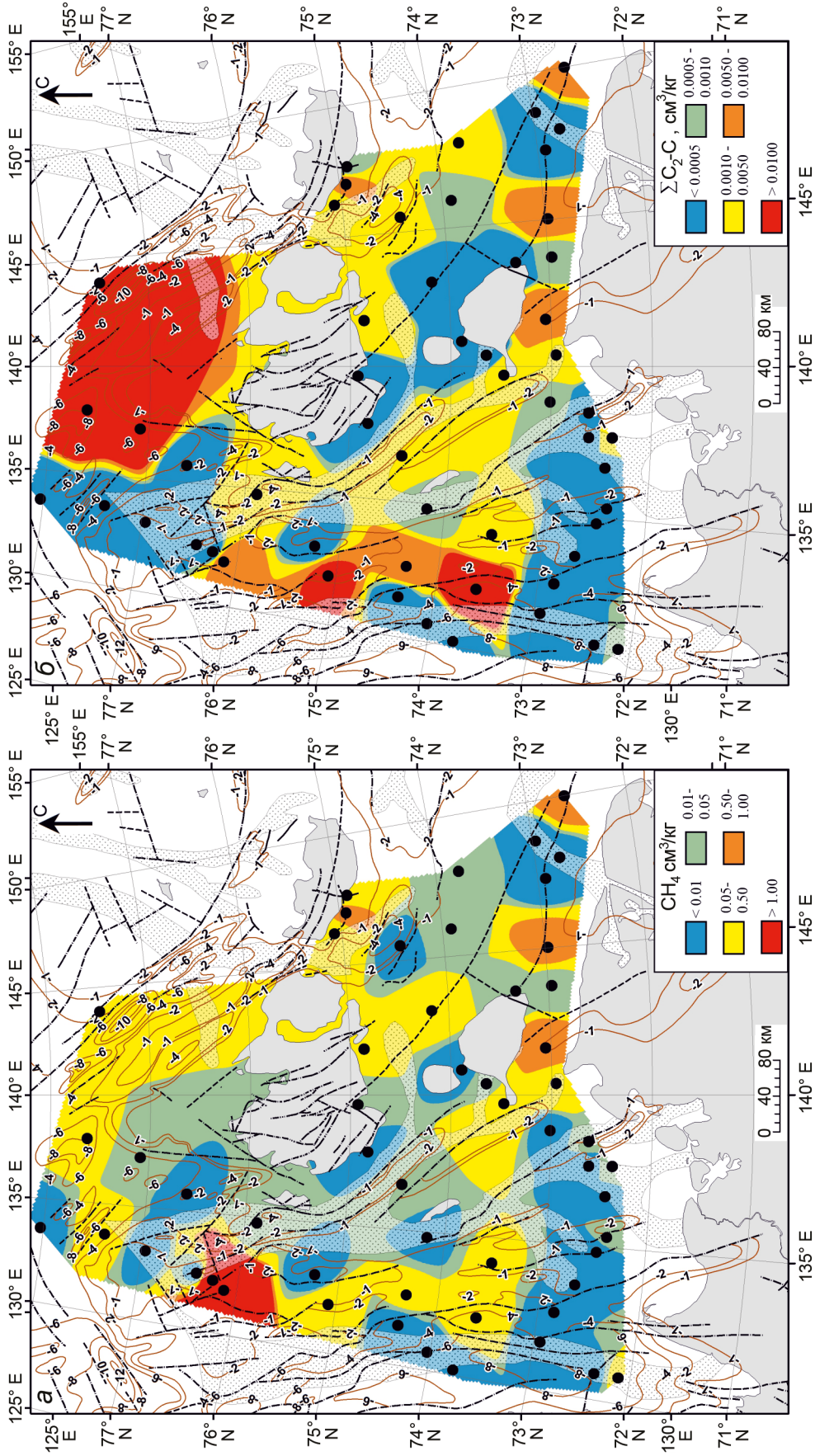


Рис. 3. Распределение концентраций метана (а) и суммы его гомологов (б) в донных осадках района исследований. Условные обозначения см. рис. 1.

ях замыкания синклинальных складок Тастахского прогиба, 0.3620 и 0.00424 – Бельковско-Святоносского, 0.0923 и 0.01849 – Новосибирского, 0.0570 и 0.02593 – Анисимовского, 0.0547 и 0.00104 см<sup>3</sup>/кг – Омолойского. Аномальные концентрации метана и суммы его гомологов до 0.0659 и 0.00165 см<sup>3</sup>/кг фиксируются на крыльях Анисимовского прогиба, 0.1524 и 0.02313 – Омолойского, 0.4580 и 0.00362 – Бельковско-Святоносского и до 0.6904 и 0.00899 см<sup>3</sup>/кг – Новосибирского (рис. 3, а, б).

В процессе исследований установлена тенденция возрастания средних концентраций УВГ донных отложений с увеличением глубин их опробования (залегания), наблюдаемая практически во всех геоструктурах и районе исследований в целом (табл. 5). Градиент нарастания средних концентраций СН<sub>4</sub> и ΣС<sub>2</sub>-С<sub>5</sub> в осадках района исследований с увеличением глубины их залегания от 10–40 до 150–250 см составляет 0.00071 и 0.000049 см<sup>3</sup>/кг на см, в антиклинальных складках – 0.00189 и 0.000020, моноклинальных – 0.00120 и 0.000015, синклинальных – 0.00046 и 0.000034 и седловины – 0.00086 и 0.000057 см<sup>3</sup>/кг на см.

Таким образом, максимальными значениями градиента массопереноса метана в ЛСЗ характеризуются осадки антиклинальных складок, минимальными – синклинальных, промежуточными – седловины и моноклиналей. Аналогичные максимальные показатели ΣС<sub>2</sub>-С<sub>5</sub> характерны для осадков синклинальных складок и седловины, минимальные – моноклинальных, промежуточные – антиклинальных. Необходимо отметить, что резкое увеличение средних концентраций СН<sub>4</sub> и снижение ΣС<sub>2</sub>-С<sub>5</sub> в осадках нижнего горизонта опробования (250–325 см) связано, по-видимому, с опробованием газонасыщенной зоны потенциальных участков метастабильности газогидратов [7, 14].

В процессе исследований установлено, что среднее содержание органического вещества (С<sub>орг</sub>) в осадках ЛСЗ характеризуются закономерным снижением от 1.64 до 0.92 % с увеличением глубины их опробования (табл. 4) на фоне возрастания средних концентраций СН<sub>4</sub>, ΣС<sub>2</sub>-С<sub>5</sub> и δ<sup>13</sup>С-СН<sub>4</sub>, что также подтверждает доминирование в донных осадках эпигенетических УВГ, а также – процессов природной диффузии и миграции газов из подстилающих газоматеринских источников над процессами биохимического преобразования органического вещества. При этом, следует отметить, что с увеличением содержания С<sub>орг</sub> в осадках верхнего горизонта Котельничского поднятия от 1.5 до 2 % наблюдается возрастание концентраций сингенетического СН<sub>4</sub> от 0.0180 до 0.0654 см<sup>3</sup>/кг.

### Влияния геологических факторов

Исходя из вышеизложенного, формирование и распределение УВГ донных осадков ЛСЗ зависит от комплексного влияния основных геологических факторов: тектоники, газоносности подстилающих литотипов и газоматеринских источников, стадии катагенеза, органической насыщенности, глубины залегания, мощности осадков, сейсмоактивности, гидрогеологических, геокриологических и других условий аккумуляции газов или их дегазации.

#### Тектонический фактор

Установлено, что средние концентрации СН<sub>4</sub> и ΣС<sub>2</sub>-С<sub>5</sub> донных отложений района исследований закономерно возрастают в западном направлении к зоне сочленения Евразийской и Северо-Американской литосферных плит от 0.1725 и 0.00230 и 0.2071 и 0.00272 см<sup>3</sup>/кг в пределах распространения Новосибирско-Чукотской и Раучано-Олойской складчатых систем до 0.3495 и 0.00305 см<sup>3</sup>/кг – Верхояно-Колымской. При этом, максимальными и аномальными концентрациями СН<sub>4</sub> и ΣС<sub>2</sub>-С<sub>5</sub> (8.3047 и 0.01966 см<sup>3</sup>/кг) характеризуются осадки Северо-Омолойского грабен-рифта, непосредственно граничащего с шовной зоной плит. В этом же направлении наблюдается возрастание степени дислоцированности складчатого фундамента и разрывной нарушенности (рис. 1, 2), являющихся основными факторами массопереноса и миграции УВГ в донные отложения и формирования их полигенезисного состава. Важным обстоятельством также является значительный подъём в районе сочленения литосферных плит поверхности «М» до 21–27 км [4], благоприятствующий процессам глубинной дегазации Земли.

Формирование и распределение аномальных концентраций УВГ в донных осадках структур ЛСЗ, как указывалось ранее, зависит не только от тектонического строения, но и от геоструктурного положения в сводовой или мульдовой части, замыкании и крыльях синклинальных и антиклинальных складок, имеющих часто тектонические границы, а также степени развития разрывной нарушенности в моноклинальных складках.

Разрывные нарушения в зависимости от степени их газопроницаемости являются как путями миграции газов, так и газопорами, способствующими накоплению УВГ в породных комплексах. Большинство продольных простиранию пород нарушений региона характеризуются, по данным геолого-съёмочных и сейсмических работ [3, 4], небольшой зоной смятия и большим их уплотнением, что значительно затрудняет вертикальную миграцию УВГ, поперечные – благоприятствуют миграционным процессам и, обычно,

Таблица 5. Изотопно-геохимические показатели УВГ донных отложений геоструктур района исследований по интервалам их опробования.

Показатели	Значения газогеохимических показателей донных отложений по интервалам их опробования, см				
	10–40	40–100	100–150	150–250	250–350
1	2	3	4	5	6
<b>Структурные террасы</b>					
CH <sub>4</sub> , см <sup>3</sup> /кг	<u>0.0017–0.0117</u> 0.0052 (10)	<u>0.0037–0.0359</u> 0.0171 (5)	<u>0.0063–0.0553</u> 0.0331 (5)	<u>0.0088–0.6723</u> <b>0.2152</b> (6)	н.о.
∑C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> , см <sup>3</sup> /кг	<u>0.00004–0.00050</u> 0.00022 (10)	<u>0.00001–0.00247</u> 0.00078 (5)	<u>0.00019–0.00806</u> <b>0.00227</b> (5)	<u>0.00028–0.00825</u> <b>0.00283</b> (6)	н.о.
δ <sup>13</sup> C-CH <sub>4</sub> , ‰	н.о.	н.о.	н.о.	<u>-59.0...-56.0</u> -57.7 (3)	н.о.
C <sub>орг</sub> , %	<u>1.82–2.02</u> 1.92 (2)	<u>1.47</u> 1.47	<u>0.93–1.20</u> 1.08 (2)	<u>0.84–1.14</u> 1.03 (3)	н.о.
<b>Поднятия, горсты</b>					
CH <sub>4</sub> , см <sup>3</sup> /кг	<u>0.0025–0.0654</u> 0.0196 (8)	<u>0.0022–0.4580</u> <b>0.0919</b> (6)	н.о.	<u>0.0637–0.6275</u> <b>0.3511</b> (3)	н.о.
∑C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> , см <sup>3</sup> /кг	<u>0.00003–0.00062</u> 0.00019 (8)	<u>0.00011–0.00403</u> <b>0.00145</b> (6)	н.о.	<u>0.00005–0.00644</u> <b>0.00374</b> (3)	н.о.
δ <sup>13</sup> C-CH <sub>4</sub> , ‰	<u>-78.0...-69.0</u> -72.3 (3)	<u>-61.0</u> -61.0	н.о.	<u>-60.9...-49.8</u> -55.4 (2)	н.о.
C <sub>орг</sub> , %	<u>0.98–1.98</u> 1.59 (8)	<u>1.14–1.70</u> 1.44 (3)	н.о.	<u>0.94–1.08</u> 1.00 (3)	н.о.
<b>Седловина</b>					
CH <sub>4</sub> , см <sup>3</sup> /кг	<u>0.0030–0.0068</u> 0.0049 (2)	<u>0.0355</u> 0.0355	<u>0.0553–0.1290</u> <b>0.0921</b> (2)	<u>0.1549</u> <b>0.1549</b>	н.о.
∑C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> , см <sup>3</sup> /кг	<u>0.00005–0.00027</u> 0.00016 (2)	<u>0.00213</u> <b>0.00213</b>	<u>0.00806–0.00845</u> <b>0.00826</b> (2)	<u>0.01019</u> <b>0.01019</b>	н.о.
δ <sup>13</sup> C-CH <sub>4</sub> , ‰	н.о.	н.о.	н.о.	<u>-53.0</u> -53.0	н.о.
C <sub>орг</sub> , %	<u>1.56</u> 1.56	<u>0.96</u> 0.96	<u>0.91–0.93</u> 0.92 (2)	<u>0.89</u> 0.89	н.о.
<b>Прогибы, грабен-рифт</b>					
CH <sub>4</sub> , см <sup>3</sup> /кг	<u>0.0024–0.0109</u> 0.0044 (10)	<u>0.0054–0.2324</u> 0.0275 (15)	<u>0.0058–0.1058</u> 0.0277 (11)	<u>0.0050–0.3620</u> <b>0.0847</b> (14)	<u>0.0346–8.3047</u> <b>2.0221</b> (6)
∑C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> , см <sup>3</sup> /кг	<u>0.00007–0.00037</u> 0.00018 (10)	<u>0.00006–0.00299</u> 0.00065 (15)	<u>0.00013–0.00433</u> <b>0.00115</b> (11)	<u>0.00003–0.01966</u> <b>0.00618</b> (14)	<u>0.0003–0.02593</u> <b>0.00307</b> (6)
δ <sup>13</sup> C-CH <sub>4</sub> , ‰	н.о.	н.о.	н.о.	<u>-49.8</u> -49.8	<u>-44.8</u> -44.8
C <sub>орг</sub> , %	<u>1.38–1.74</u> 1.56 (2)	<u>1.01–1.72</u> 1.30 (4)	<u>0.92–1.24</u> 1.08 (3)	<u>0.62–1.32</u> 0.92 (9)	<u>0.56–1.20</u> 0.92 (3)
<b>Район исследований</b>					
CH <sub>4</sub> , см <sup>3</sup> /кг	<u>0.0017–0.0654</u> 0.0087 (30)	<u>0.0022–0.4580</u> 0.0407 (27)	<u>0.0058–0.1290</u> 0.0391 (18)	<u>0.0048–0.6900</u> <b>0.1327</b> (24)	<u>0.0346–8.3047</u> <b>2.0221</b> (6)
∑C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> , см <sup>3</sup> /кг	<u>0.00003–0.00062</u> 0.00019 (30)	<u>0.00001–0.00403</u> 0.00091 (27)	<u>0.00013–0.00845</u> <b>0.00212</b> (18)	<u>0.00003–0.02313</u> <b>0.00880</b> (24)	<u>0.0003–0.02593</u> <b>0.00307</b> (6)
δ <sup>13</sup> C-CH <sub>4</sub> , ‰	<u>-78.0...-69.0</u> -72.3 (3)	<u>-61.0</u> -61.0	н.о.	<u>-60.9...-49.8</u> -55.2 (7)	<u>-44.8</u> -44.8
C <sub>орг</sub> , %	<u>1.38–2.02*</u> 1.64 (13)	<u>0.96–1.72</u> 1.33 (9)	<u>0.91–1.24</u> 1.05 (5)	<u>0.62–1.32</u> 0.95 (16)	<u>0.56–1.20</u> 0.92 (3)

Примечание. в числителе \* – от-до, в знаменателе – среднее значение (количество случаев); н.о. – не определялось. Жирным шрифтом выделены аномальные концентрации УВГ.



дегазируют породную толщу. Диагональные нарушения характеризуются значительной зоной перемятых и трещиноватых пород и также оказывают дегазирующее влияние, однако в случае резкого изменения их простирания характеризуются формированием зон уплотненных пород низкой газопроницаемости и являются газопорами [4, 7–9].

**Сейсмоактивность** играет двоякую роль в формировании газонасыщенности донных осадков ЛСЗ. Наличие предполагаемых конденсатных, гидратоносных и других газоносных подстилающих отложений, с одной стороны, способствует перераспределению и подтоку УВГ в верхние горизонты и повышает УВ-насыщенность осадков в процессе развития и активизации землетрясений, с другой – дегазирует их с газовыделением в водную толщу и атмосферу. Соотношение этих процессов, по-видимому, зависит от глубины землетрясений, газоносности пород и тектонического фактора. Установлено, что в пределах линейной сейсмоактивной зоны сочленения литосферных плит, представленной цепочкой эпицентров землетрясений (рис. 1), в донных осадках наблюдаются аномалии  $\text{CH}_4$  0.0507–8.3047 и  $\Sigma\text{C}_2\text{--C}_5$  – 0.00115–0.0197  $\text{см}^3/\text{кг}$ .

#### **Магматизм**

Концентрации  $\text{CH}_4$  и  $\Sigma\text{C}_2\text{--C}_5$  в эффузивных породах о-ва Бол. Ляховский по данным газового опробования керна скважин характеризуются низкими значениями, относительно других литотипов – до 2.81 и 0.032  $\text{см}^3/\text{кг}$ . Данное положение, по-видимому, объясняет факт минимальных концентраций УВГ в донных осадках на участках развития магматических образований ЛСЗ (табл. 2) и указывает на их низкий миграционный углеводородный потенциал на фоне протекания процесса природной дегазации осадков.

**Газоносность** подстилающих литотипов и газоматеринских источников является одним из основных факторов формирования и распределения УВГ в донных осадках ЛСЗ. Формирование аномальных средних концентраций  $\text{CH}_4$  наблюдаются на участках развития потенциально газогидратных и угольных залежей, предполагаемых нефтегазовых и конденсатных залежей, торфяников и твердых битумов;  $\Sigma\text{C}_2\text{--C}_5$  – предполагаемых залежей нефтяного ряда и конденсата, угольных и гидратных залежей, а также предполагаемых конденсатногазовых залежей и твердых битумов. На площадях развития остальных литотипов и газоматеринских источников эти аномалии УВГ отсутствуют (табл. 2).

#### **Катагенез**

В процессе изучения миграционных УВГ угленосных формаций установлено, что средние концентрации  $\text{CH}_4$  и  $\Sigma\text{C}_2\text{--C}_5$  в осадках на участках развития

торфяников составляют 0.0681 и 0.00081, бурых углей (стадий катагенеза  $\text{ПК}_1\text{--ПК}_2$ ) – 0.1836 и 0.00226 и каменных углей ( $\text{МК}_1$ ) – 0.4922 и 0.00615  $\text{см}^3/\text{кг}$ . Таким образом, с увеличением стадии катагенеза газоматеринского источника (от  $\text{ПК}_1$  до  $\text{МК}_1$ ) в донных отложениях ЛСЗ наблюдается семикратное возрастание средних концентраций УВГ, что установлено и по данным скважинного газового опробования (см. раздел «Газоносность»).

Необходимо отметить, что на вышеуказанную закономерность также наложена изменчивость увеличения концентраций УВГ со стратиграфической (от  $\text{Q-N}_2^3$  до  $\text{K}_1$ ) и установленной (фактической) глубиной залегания указанных источников и донных осадков (табл. 4), а также мощности четвертичных донных отложений, максимальные значения которых зафиксированы в пределах палеодолин рек района исследований.

#### **Геокриологические и гидрогеологические условия**

Многолетнемерзлые породы и мерзлые донные осадки выполняют роль газопора и затрудняют процессы природной диффузии и миграции УВГ, «консервируют» имевшиеся УВ-газы, снижают газопроницаемость отложений и, как следствие, способствуют резкому возрастанию концентраций ПГ на границе зоны мерзлота-талика, что наблюдается в скважинах при вскрытии этой зоны, в ряде случаев сопровождающемся газопроявлениями и выбросами газа. Данная ситуация, вероятно, имеет место на участках формирования газогидратных залежей в донных отложениях. Пластовые скопления подземных вод позднемеловых-кайнозойских отложений характеризуются высокими содержаниями  $\text{CH}_4$  и  $\Sigma\text{C}_2\text{--C}_5$  до 51.70 и 0.011 %, соответственно и газонасыщенности в целом до 70  $\text{см}^3/\text{л}$ , что указывает на возможность обогащения УВГ донных отложений в процессе перехода их из растворенного в свободное состояние при перенасыщенности их в подземных водах.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Лаптево-Сибироморская зона характеризуется сложным геологическим и тектоническим строением палеозойских, мезозойских и кайнозойских карбонатных, терригенно-карбонатных и терригенных породных комплексов, осложненных развитием пликативной и разрывной тектоники, высокой сейсмической активности и магматической деятельности, интенсивность которых значительно возрастает в районе сочленения Евразийской и Северо-Американской литосферных плит.

В составе УВГ пород и донных осадков ЛСЗ установлены метан и его предельные и непредельные

гомологи до пентана включительно. Изотопно-газо-геохимические показатели УВГ свидетельствуют о наличии в осадках ЛСЗ как сингенетических, так и доминирующих эпигенетических (миграционных) газов различных литотипов и газоматеринских биохомогенных, метаморфогенных и магматогенных источников.

Формирование состава и концентраций УВГ донных отложений ЛСЗ подчиняются правилам аддитивности, т. е. последовательного накопления в осадках УВГ различного генезиса с преобладанием газовой фазы и геохимических показателей более газонасыщенного сингенетического или эпигенетического газоматеринского источника.

Концентрации  $\text{CH}_4$  и  $\Sigma\text{C}_2\text{--C}_5$  в донных осадках ЛСЗ достигают 8.3047 и 0.02593  $\text{cm}^3/\text{kg}$ , что указывает на формирование в них геохимических аномалий УВГ, превышающих пороговые критерии их аномальности в 166 и 26 раз, соответственно.

Формирование и распределение УВГ в осадках зависит от комплексного влияния геологических факторов на процессы аккумуляции газов или их дегазации.

**Источники финансирования.** Газогеохимические исследования выполнены за счёт гранта Российского научного фонда № 23-27-00321 «Газонасыщенность донных осадков окраинных морей Евразии: распределение, влияние геологических факторов, особенности генезиса» (<https://rscf.ru/project/23-27-00321/>).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Велев В.Х. Молекулярная масса углеводородной фракции и весовое распределение компонентов  $\text{C}_1\text{--C}_5$  в природных газах разных генетических типов. Органическая геохимия нефтей, газов и органического вещества докембрия / Под ред. А.А. Алексеева. М.: Наука, 1981. С. 22–28.
2. Высоцкий И.В. Геология природного газа. М.: Недра, 1979. 392 с.
3. Государственная геологическая карта. 1:1 000 000 (новая серия). Лист S–53–55. Новосибирские острова: Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. 208 с.
4. Государственная геологическая карта. 1:1 000 000 (3-е поколение). Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S–53 (о. Столбовой), S–54 (Ляховские о-ва): Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016. 309 с.
5. Государственная геологическая карта России и прилегающих акваторий. 1:2 500 000. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016.
6. Гресов А.И. Геохимическая классификация углеводородных газов углефтегазоносных бассейнов Востока России // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 2. С. 87–103.
7. Гресов А.И. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока и перспективы её промышленного освоения. Т. 2. Углеметановые бассейны Республики Саха (Якутия) и Северо-Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2012. 468 с.
8. Гресов А.И., Яцук А.В. Геологические условия формирования газонасыщенности донных отложений осадочных бассейнов юго-восточного сектора Восточно-Сибирского моря // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 2. С. 197–215.
9. Гресов А.И., Яцук А.В. Газогеохимические показатели углефтегазоносности осадочных бассейнов и геоструктур центральной и западной части Восточно-Сибирского моря // Геология нефти и газа. 2023. № 1. С. 95–110.
10. Кассенс Х., А.П. Лисицын А.П., Тиде Й., Полякова Е.И., Тимохов Л.А., Фролов И.Е. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М.: МГУ, 2009. 608 с.
11. Клубов Б.А. Природные битумы Севера. М.: Наука, 1983. 205 с.
12. Мальшев Н.А., Обметко В.В., Бородулин А.А. и др. Тектоника осадочных бассейнов российского шельфа Чукотского моря: Материалы XXIII тектонического совещ.: «Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя». М.: ГИН РАН, 2010. Т. 2. С. 23–29.
13. Соколов С.Д., Тучкова М.И., Ганелин А.В. и др. Тектоника Южно-Аннуйской сутуры (Северо-Восток Азии) // Геотектоника. 2015. № 1. С. 5–30.
14. Якушев В.С., Перлова Е.В., Кривушин К.В. и др. Газовые гидраты в отложениях материков и островов // Российский хим. журнал. 2003. Т. XLVII, № 3. С. 80–90.
15. Яшин Д.С., Ким Б.И. Геохимические признаки нефтегазоносности Восточно-Арктического шельфа России // Геология нефти и газа. № 4. 2007. С. 24–35.
16. Abrams M. Significance of hydrocarbon seepage to petroleum generation and entrapment // Marine and Petroleum Geology. 2005. V. 22, N 4. P. 457–477.
17. Cramer B., Franke D. Indication for a petroleum system in the Laptev Sea, NE Siberia // Petroleum Geol. 2005. V. 28, N 4. P. 1–15.
18. Wild B., Shakhova N., Dudarev O. et al. Organic matter composition and greenhouse gas production of thawing subsea permafrost in the Laptev Sea // Nature Communications. 2022. V. 13, N 5057.
19. Yatsuk A., Gresov A., Snyder. G. Hydrocarbon gases in seafloor sediments of the edge shelf zone of the East Siberian Sea and adjacent part of the Arctic Ocean // Frontiers in Earth Sci. 2022. V. 10:856496.

Рекомендована к печати Г.Л. Кирилловой

после доработки 26.09.2023 г.

принята к печати 23.11.2023 г.

*A.I. Gresov, A.V. Yatsuk*

**Distribution and genesis of hydrocarbon gases in bottom sediments of the Laptev-Siberian Sea zone of the East Arctic Shelf**

Gases from bottom sediments of the Laptev–Siberian Sea zone contain methane (up to 8.3047 cm<sup>3</sup>/kg) and its homologues (down to and including pentane) totaling 0.0259 cm<sup>3</sup>/kg. The established values of the carbon isotope composition of methane ( $\delta^{13}\text{C}$ ), the molecular weight of the hydrocarbon fraction, the weight concentrations of C<sub>1</sub>–C<sub>5</sub> hydrocarbons and their ratios, the «wetness» and «transformation» coefficients of the hydrocarbons fraction, indicate the presence of various syngenetic and epigenetic gases in bottom sediments. Potential gas sources are modern sediments, peat, coal, gas and gas hydrate? deposits, solid bitumen, igneous rocks, and inferred oil and gas accumulations. It has been established that the distribution of hydrocarbon gases in sediments vertically and horizontally depends on the influence of a complex of geological factors – fold and fault tectonics, magmatism and seismic activity in the region, coal, oil and gas potential and bituminosity, organic saturation and lithological composition, hydrogeological, geocryological, and other conditions for accumulation of gases or their degassing.

**Key words:** bottom sediments, hydrocarbon gases, genesis, gas saturation, anomalies, geological factors, oil and gas content, Laptev-Siberian Sea zone.