

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.345: 553.981 (47: 211)

ГЕОСТРУКТУРНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕРЗЛОТЫ
В УГЛЕГАЗОНОСНЫХ БАСЕЙНАХ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

А.И. Гресов, А.И. Обжиров, А.В. Яцук

*Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН,
690048, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия; gresov@poi.dvo.ru*

Обобщены и проанализированы результаты геокриологических исследований и изучения газоносности угольных бассейнов Северо-Востока России. Установлены шесть основных региональных закономерностей распределения углегазоносности и мерзлоты, изменчивость теплового и метанового потоков, газокриологическая зональность, состав газа и газопроницаемость угленосных формаций в зонах вечной мерзлоты.

Уголь, бассейн, мерзлота, газ, зональность, метан, газоносность

GEOSTRUCTURAL REGULARITIES OF THE DISTRIBUTIONS OF PERMAFROST
IN GAS- AND COAL-BEARING BASINS IN THE NORTH-EAST OF RUSSIA

A.I. Gresov, A.I. Obzhirov, A.V. Yatzuk

*Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS,
690095, Vladivostok, Baltiyskay str., 43, Russia; gresov@poi.dvo.ru*

The results of cryological researches and study of gas presence in the coal basins of North-East Russia have been summarized and analyzed. The six basic regularities of the distribution of natural gas and permafrost, changeability of heat and methane flows, gas cryological zonality, gas composition and gas permeability of coal formations in permafrost have been determined.

Coal, basin, permafrost, gas, zoning, methane, gas presence

ВВЕДЕНИЕ

Особенностью Северо-Востока России является практически повсеместное развитие углегазоносных отложений в условиях распространения сплошной многолетней мерзлоты, занимающих более половины территории региона. Геокриологические условия угленосных осадочных бассейнов определяются сочетанием геолого-географических факторов, периодичностью протаивания и промерзания пород в голоцене и плейстоцене. Большинство бассейнов характеризуются высокой газоносностью угольных пластов и газонасыщенностью вмещающих пород, значительными ресурсами сорбированного, свободного и водорастворенного метана и по своей промышленной значимости относятся к *углегазоносным*.

Криологические условия являются основным фактором сохранения газоносности бассейнов и формирования скоплений и залежей свободных и водорастворенных газов как в мерзлом угленосном массиве, так и под мерзлотой. Газобезопасное

и успешное развитие геолого-разведочных и горных работ в регионе невозможно без анализа накопленного фактического материала, выявления региональных закономерностей формирования газоносности и мерзлоты и прогнозирования их показателей в слабоизученных угленосных бассейнах. Важен и экологический аспект исследований – углегазоносные бассейны являются крупнейшими источниками выбросов парниковых газов в атмосферу региона. Освещению этих актуальных региональных проблем посвящена настоящая работа.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу работы положены результаты сопоставительного анализа данных криологических и газогеохимических исследований в осадочных угленосных бассейнах Северо-Востока России. Применялись методы криологических исследований,

прямого изучения газоносности керногазонаборниками и пластоиспытателями, газопроницаемости и коллекторских свойств углей и пород в соответствии с действующими нормативными документами [Инструкция..., 1977; Руководство..., 1987]. В сопоставительном газокриологическом анализе использованы данные более 3000 определений. В горных выработках шахт региона в скважинах проведены термометрические и газовые исследования в мерзлых и талых угленосных массивах с применением газоиспытателей, образцовых микроанометров, расходомеров и термометров, результаты которых являлись исходными показателями для расчета газопроницаемости по методике ВостНИИ [Чернов, 1979]. С целью оценки потоков метана и выбросов его в атмосферу применялись методика С.В. Яговкина и др. [2004] и метод подпочвенных газовых съемок. Хроматографические исследования выполнены в газогеохимических лабораториях ООО «Дальвостугле-разведка» (А.В. Курьяновым и др.) и ТОИ ДВО РАН (Е.В. Мальцевой) на хроматографах Газохром 2000, 3101; ЛХМ-80 и Кристалл Люкс 4000М (Россия) в период 1984–2012 гг. Анализы изотопного состава углерода CH_4 и CO_2 выполнялись в лабораториях МГРИ (О.И. Кропотовой), ДВГИ ДВО РАН (А.В. Игнатьевым) и Университета Хоккайдо (Ugumu Tsunogai).

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГАЗОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

Территория Северо-Востока России по мощности, температурному режиму и сплошности распространения многолетнемерзлых пород подраз-

деляется на Южную и Северную криологические (СКЗ) зоны, в пределах которых развиты площади с распространением сплошной, прерывистой и островной мерзлоты. Прерывистость мерзлоты определяется формированием таликов, приуроченных к долинам рек Лена, Алдан, Индигирка, Колыма, Анадырь и другим, крупным озерам и побережью морей. Углегазоносные осадочные бассейны СКЗ являются целевыми объектами настоящих исследований. Расположение и основные показатели мерзлоты и газоносности данных бассейнов приведены на рис. 1 и в таблице.

Исследованиями установлены шесть основных закономерностей распространения мерзлоты в бассейнах Северо-Востока России.

Первая газогеокриологическая закономерность связана со смещением угленосности бассейнов в верхние стратиграфические горизонты по мере приближения к Тихому океану. Эта особенность, впервые подмечена А.К. Матвеевым [1957], который установил, что в западном секторе Тихоокеанского подвижного пояса происходит смена геологического возраста угленосных толщ от перми к юре, затем к мелу, потом к палеогену и неогену в прибрежной и шельфовой частях региона. В географическом плане это выражается сменной палеозойской угленосности Сибирской платформы последовательно зонами юрской угленосности Забайкалья, юрско-меловой угленосностью Якутии, меловой и сменяющей ее кайнозойской – окраинной части Тихоокеанского побережья. В этом же направлении установлен переход зоны сплошного распространения мерзлоты к прерывистой и островной с изменением мощности тол-

Газогеокриологические показатели основных угольных бассейнов Северо-Востока России

Угольный бассейн	Марка угля	Мощность мерзлоты, м	Температура пород*, °С	Геотермический градиент**, °С/100 м	Тип мерзлоты, прерывистость	Площадь талых пород, %	Метаноносность пластов угля, м ³ /т
Ленский	ЗБ–КЖ	75–650	–2,8...–7,8	1,3–3,6 (2,6)	Сплошная	9	14–30
Лаптевско-Янский	2Б–ЗБ	170–470	–3,6...–10,2	1,4–4,6 (3,1)	»	8	5–11
Зырянский	ЗБ–Т	60–360	–2,2...–6,5	1,5–4,3 (3,3)	»	9	20–29
Анюйский	Д, Т	80–300	–2,4...–7,0	1,5–4,4 (3,5)	»	10	18–27
Чаун-Чукотский	Т–А	50–150	–1,2...–3,0	2,4–3,7 (3,1)	»	12	15–18
Анадырский	ЗБ–Г	70–220	–2,4...–6,0	2,0–4,7 (3,5)	»	10	14–20
Пенжинский	ЗБ–Г	50–200	–1,2...–4,0	2,1–4,9 (3,7)	»	10	14–20
Омсукачанский	Т–А	50–110	–1,0...–2,8	2,5–3,7 (3,1)	»	11	15–18
Аркагалинский	Д–ГЖ	100–280	–1,2...–7,5	2,5–3,2 (2,9)	»	10	11–14
Беринговский	Д–КЖ	30–120	–1,0...–3,2	2,2–4,2 (3,3)	Прерывистая	25	18–24
Южно-Якутский	Г–К	20–240	–0,2...–3,0	1,9–4,3 (3,4)	»	45	16–21
Олоторский	ЗБ–Д	5–30	–0,1...–1,1	3,5–6,7 (5,9)	Островная	70	12–16
Западно-Камчатский	ЗБ–Г	5–15	–0,1...–0,7	4,8–9,0 (7,0)	»	85	11–17

Примечание. Составлена по данным [Некрасов, 1976; Региональные исследования..., 1983; Худяков, 1986; Гресов, 1996, 2012; Угольная база..., 1999].

* Температура пород на подошве слоя.

** Минимальное и максимальное значения, в скобках – среднее.

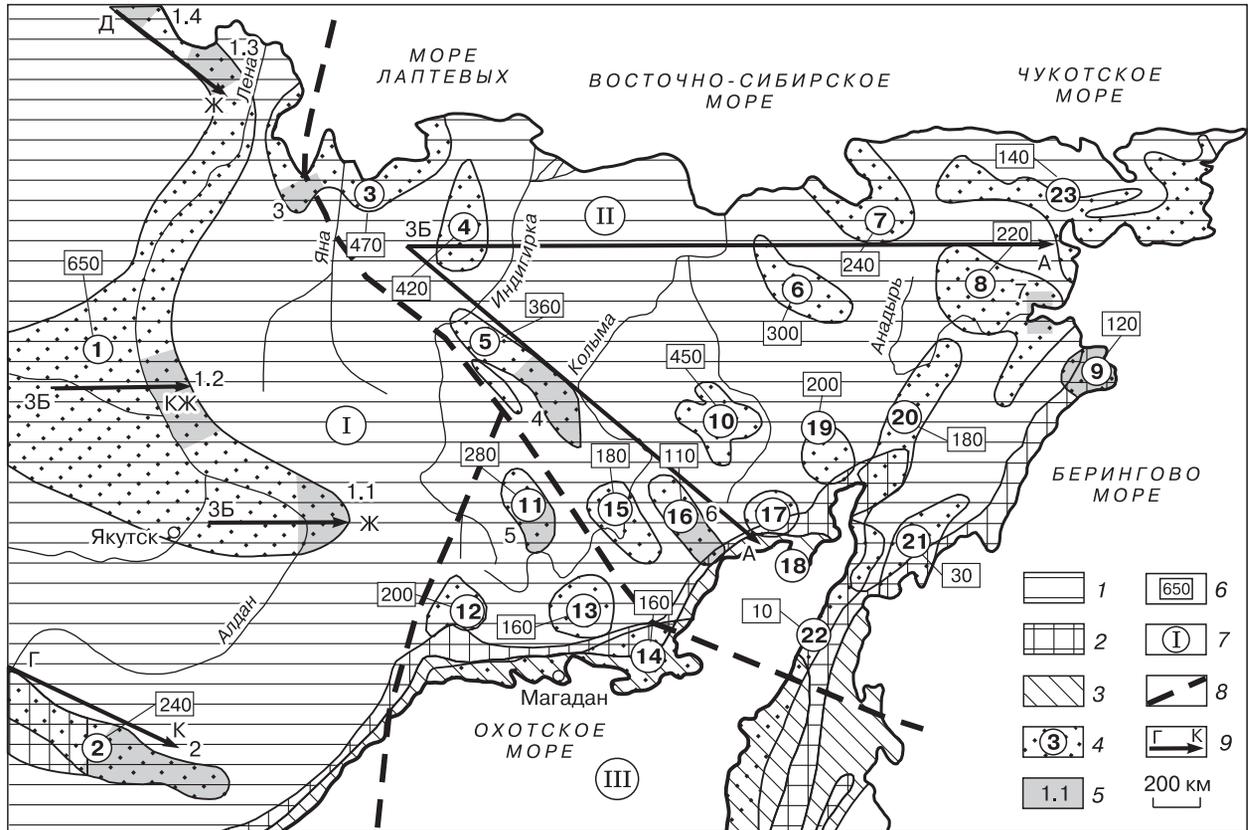


Рис. 1. Схематическая карта распространения многолетнемерзлых пород Северо-Востока России:

1–3 – площади распространения мерзлоты: 1 – сплошной, 2 – прерывистой, 3 – массивно-островной; 4 – угольные бассейны: 1 – Ленский, 2 – Южно-Якутский, 3 – Лаптевско-Янский, 4 – Тастахский, 5 – Зырянский, 6 – Анойский, 7 – Чаунский, 8 – Анадырский, 9 – Беринговский, 10 – Омолонский, 11 – Аркагалинский, 12 – Челомджинский, 13 – Хасынский, 14 – Охотский, 15 – Сеймчано-Буюндинский, 16 – Омсукчанский, 17 – Авековский, 18 – Тайгоносский, 19 – Пареньский, 20 – Пенжинский, 21 – Олоторский, 22 – Западно-Камчатский, 23 – Чаун-Чукотский; 5 – целевые углегазоносные районы исследований: 1.1 – Нижне-Алданский, 1.2 – Сангарский, 1.3 – Оленекский, 1.4 – Анабаро-Хатангский; 2 – Алдано-Чульманский, Гонамский, Токинский, 3 – Куларский, 4 – Зыряно-Силяпский, 5 – Нижне-Аркагалинский, 6 – Галимовский, 7 – Онеменский, 8 – месторождения Бухты Угольной и Амаамское; 6 – абсолютные значения мощности толщи многолетнемерзлых пород, м; 7 – литосферные плиты: I – Евразийская, II – Североамериканская, III – Охотоморская; 8 – границы литосферных плит; 9 – основные направления возрастания степени метаморфизма углей: ЗБ, Д, Г, Ж, КЖ, К, А – марочный состав угля.

щи многолетнемерзлых пород (ТММП) от 650–250, 200–100 м до 50–10 м. Изменение данной зональности в направлении к Тихому океану сопровождается возрастанием степени метаморфизма углей, интенсивности развития свободных газопроявлений (до 5–10 на 1 км²) и газонасыщенности угленосных толщ, тектонической нарушенности (до 150 нарушений на 1 км²), сейсмичности (до 7–8 баллов) и неотектонических процессов, магматизма и вулканизма, термального и термально-контактного метаморфизма углей, теплового потока и геотермического градиента с максимумом в пределах Охотско-Чукотского и Камчатского вулканических поясов. Влияние этих геологических факторов обуславливает уменьшение мощности мерзлоты, вплоть до ее исчезнове-

ния в бассейнах Тихоокеанского континентально-го обрамления [Угольная база..., 1999; Фандюшкин, Гресов, 2006; Гресов, 2012].

В исследованных угленосных бассейнах региона мощность мерзлоты и геотермического градиента существенно зависит от возраста фундамента, изменение которого также меняется в восточном и юго-восточном направлениях. Для бассейнов Сибирской платформы Евразийской литосферной плиты, перекрывающих кембрийский фундамент, значения геотермического градиента составляют 2,6–3,2 °С/100 м (в среднем 2,8); ТММП до 240–650 м, палеозойский фундамент Североамериканской плиты – градиент 3,0–3,5 °С/100 м (в среднем 3,2), ТММП до 360 м. Для Омсукчанского, Беринговского, Анадырского и других бассейнов

Североамериканской плиты с мезойским фундаментом геотермический градиент в среднем составляет $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ и мощность ТММП до 220 м; для бассейнов Охотоморской плиты с кайнозойским фундаментом градиент $4,7\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, ТММП до 50 м [Некрасов, 1976; Высоцкий, 1979; Угольная база..., 1999; Гресов, 2012].

Вторая закономерность заключается в том, что в развитии мерзлоты региона интенсивно проявляются аazonальные особенности, не зависящие от географической широты местности и выражающиеся в резкой изменчивости температур мерзлых пород и их мощности на коротких расстояниях, связанной с развитием углегазоносных формаций. Для площадей, сложенных углегазоносными отложениями, характерны мощности мерзлоты 60–320 м, в безугольных толщах – 100–650 м. В Ленском бассейне мощность мерзлоты в углегазоносных отложениях Нижне-Алданского, Сангарского и Анабаро-Хатангского районов варьирует в пределах 60–320 м, в безугольных – 350–650 м, в Омолонском бассейне – 140–210 и 250–350 м, в Лаптевско-Янском – 160–260 и 380–480 м. Аналогичное распространение мерзлоты наблюдается в Аркагалинском, Анадырском, Зырянском и других бассейнах. Это объясняется увеличением значений геотермического градиента и показателей теплового потока в угленосных отложениях, в 1,5–3 раза превышающих аналогичные показатели в безугольных [Некрасов, 1976; Угольная база..., 1999].

Исследованиями установлено, что низкая теплопроводность и высокая теплоемкость газоносных угольных пластов – основные факторы, влияющие на мощность мерзлоты и величину теплового и метанового потоков. В результате этих различий в ТММП Северо-Востока России тепловой ($14\text{--}136\text{ мВт}/\text{м}^2$ и метановый ($8,5\text{--}47\text{ }808\text{ мг}/(\text{м}^2\text{-сут})$) потоки в угленосном массиве характеризуются резко изменяющимися показателями, максимумы которых концентрируются в кровле и почве угольных пластов и в местах разрыва их сплошности в зонах тектонических нарушений. Данные зоны являются горизонтами фокусировки метанового и геотермального потоков. В мощных газоносных угольных пластах Южно-Якутского (до 79 м), Омсукчанского (до 39), Аркагалинского (до 32), Зырянского (до 14), Ленского (до 12 м) и других бассейнов создается наиболее контрастная картина изменчивости указанных показателей. Высокая угленасыщенность Ленского (более 100 угольных пластов), Южно-Якутского (194–224), Зырянского (147–193) и других бассейнов региона также обуславливает возрастание геотермических и газодинамических показателей в угленосных отложениях [Бузов, Гресов, 2011; Гресов, 2012].

По данным С.П. Никитина [Никитин и др., 1985], газопроницаемость безугольных мерзлых отложений Зырянского бассейна достигает $0,003\text{--}0,004\text{ мкм}^2$, угленосных – $0,60\text{ мкм}^2$. По данным подземных исследований в Ленском, Беринговском и Анадырском бассейнах, угленосные мерзлые массивы характеризуются газопроницаемостью параллельно напластованию в кровле пластов от $0,05$ до $3,48\text{ мкм}^2$, в средней части – $0,01\text{--}0,87\text{ мкм}^2$ и почве – $0,04\text{--}2,04\text{ мкм}^2$, превышающей на порядок и более ее значения в породах. Максимальными показателями газопроницаемости (до $4,76\text{ мкм}^2$) и метанового потока (до $48\text{ г}/(\text{м}^2\text{-сут})$) характеризуются угленосные трещиноватые зоны разломов, тектонических нарушений и сквозных таликов. В углегазоносных бассейнах региона, осложненных магматизмом (Омсукчанский, Чаун-Чукотский, Тайгоносский и др.) максимальные значения газопроницаемости (до $3,9\text{ мкм}^2$), теплового (до $120\text{ мВт}/\text{м}^2$) и метанового (до $9,2\text{ г}/(\text{м}^2\text{-сут})$) потоков характерны для приконтактных трещиноватых зон внедрения в угленосную толщу магматических образований [Гресов, 1996; Геология..., 2002; Гресов, 2012]. Таким образом, основными путями миграции (газопереноса) в ТММП угленосных бассейнов являются угольные пласты, зоны разломов, крупных тектонических нарушений и внедрения магматических образований.

Третья закономерность заключается в том, что в угольных бассейнах в равнозначных геолого-географических условиях мощность мерзлоты и метаносность существенно зависят от степени метаморфизма углей. С возрастанием степени метаморфизма углей наблюдаются увеличение метаносности угольных пластов и уменьшение мощности ТММП. Так, в Зырянском бассейне на площадях развития тощих углей с метаносностью до $13\text{--}14\text{ м}^3/\text{т}$ на глубине 300 м мощность мерзлоты составляет 60–80 м, марочного состава КЖ – 100–160 м, до $12\text{ м}^3/\text{т}$; Ж-Г – 150–210 м, до $10\text{--}11\text{ м}^3/\text{т}$; Д-Г – 160–240 м, до $8\text{--}10\text{ м}^3/\text{т}$. Аналогичные показатели для углей Ленского бассейна марки Д составляют 220–380 м и $8\text{--}10\text{ м}^3/\text{т}$; Г – 120–200 м, $10\text{--}12\text{ м}^3/\text{т}$; Ж и К – 70–160 м, $12\text{--}14\text{ м}^3/\text{т}$; для Беринговского бассейна: Д-Г – 40–130 м, $10\text{--}13\text{ м}^3/\text{т}$; Ж-КЖ – 20–70 м, $14\text{--}16\text{ м}^3/\text{т}$ на глубине 300 м. В Аркагалинском и Омсукчанском бассейнах, расположенных в пределах одной широты, мощность мерзлоты в угленосных отложениях первого с развитием углей марочного состава Д-Г в 2–2,5 раза больше, чем у второго – с углями марки Г-А. Это связано с формированием термально-метаморфизованных тощих углей и антрацитов в процессе внедрения в угленосную толщу магматических образований. Установлено, что теплопроводность и метаносность термально-

метаморфизованных углей Омсукчанского бассейна в 1,2–1,4 раза выше, чем у регионально-метаморфизованных углей Аркагалинского [Гресов, 2012]. Кроме того, наличие в тощих углях и антрацитах примеси графита значительно повышает их теплопроводность [Herrin, Deming, 1996].

Угленосные отложения являются важнейшим газоматеринским комплексом, генерирующим метан. Метаноносность углей различных стадий метаморфизма в углегазонасных бассейнах с распространением сплошной мерзлоты достигает 10–30 м³/т, прерывистой – 8–24 и островной – 5–18 м³/т. Перспективные для извлечения ресурсы метана угольных пластов (с метаноносностью более 8 м³/т) первых бассейнов (Ленский, Зырянский, Анюйский и др.) составляют 3,62 трлн м³, вторых (Южно-Якутский, Буреинский, Беринговский и др.) – 0,93 трлн м³ и третьих (Западно-Камчатский, Олюторский, Охотский и др.) – 0,14 трлн м³. Перспективные для извлечения ресурсы угольного метана в бассейнах с отсутствием мерзлоты (Партизанский, Угловский, Сахалинский и др.) составляют всего 0,13 трлн м³ [Гресов, 2012]. Важной газокриологической особенностью Северо-Востока России является формирование в углегазонасных бассейнах залежей свободного метана в зонах “сухих” таликов мощностью до 20–70 м, образованных в подмерзлотном углепородном массиве, расположенном выше уровня подземных вод. С вскрытием этих зон связаны интенсивные “сухие” выбросы газа и суфляры с дебитом метана 1–15 м³/мин в Ленском, Беринговском, Зырянском и других бассейнах.

Наиболее мощные залежи свободного метана связаны с куполовидными поднятиями мерзлоты в зонах антиклинальных складок, осложненных тектонической нарушенностью надвигового и взбросового типов (рис. 2). Перспективные для

извлечения ресурсы метана, сконцентрированные в зонах “сухих” таликов в Ленском, Беринговском, Зырянском и других бассейнах региона, по состоянию геолого-газовой изученности на 01.01.2012 г. составляют 7 млрд м³. В случаях расположения гидростатического уровня выше нижней границы мерзлоты в ряде случаев наблюдается формирование мощного верхнего подмерзлотного газодонасыщенного горизонта, с вскрытием которого связаны самоизлив подземных вод с интенсивным выделением свободного и водорастворенного газа. В зонах тектонических нарушений в сводовых частях антиклинальных складок (месторождения Чечумское, Сангарское, Бухты Угольной и др.) отмечались выбросы воды и газа. В процессе исследований установлена высокая метаноносность подземных вод верхнего подмерзлотного горизонта, составляющая 0,1–0,3 м³/м³ и более. Перспективные для извлечения ресурсы растворенного метана Ленского, Зырянского, Южно-Якутского, Беринговского и других бассейнов составляют 5 млрд м³. Всего перспективные ресурсы свободного и водорастворенного метана составляют 12 млрд м³ [Гресов, 2012]. Таким образом, геокриологические условия являются важнейшим фактором сохранения газонасности и формирования метаноресурсной базы углегазонасных бассейнов Северо-Востока России – крупнейших генерационно-аккумулятивных “хранилищ” метана, что по сути является **четвертой региональной газокриологической закономерностью**.

Образование и формирование ряда угольных и нефтегазонасных бассейнов региона происходило в общих областях консолидации и связано единой историей геологического развития. Совместное и территориальное залегание пластов угля, залежей природного газа и нефти, а также цикличность их образования позволяют большинство бассейнов

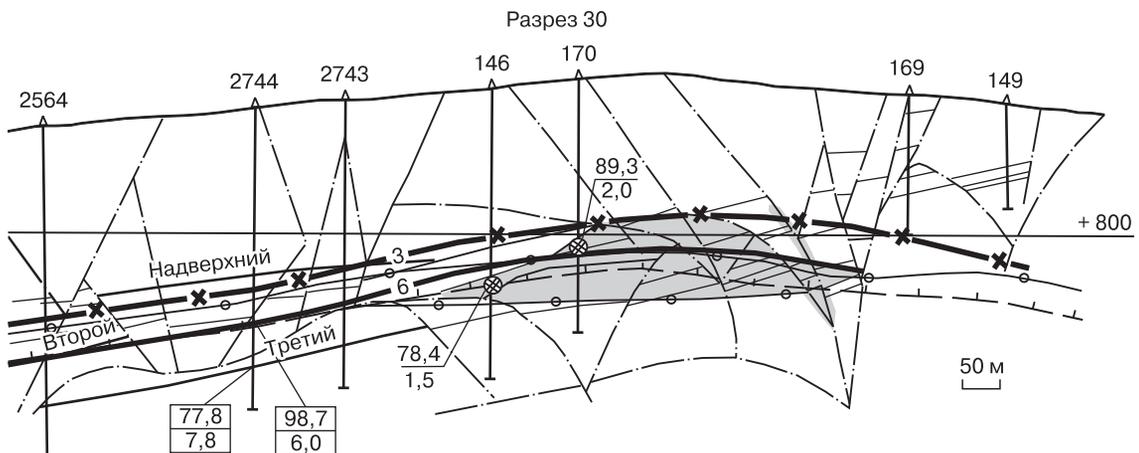


Рис. 2. Газокриологический разрез Нижне-Аркагалинского месторождения Аркагалинского угольного бассейна.

Усл. обозн. см. на рис. 3.

региона рассматривать как углефтегазоносные [Нефтегазоносность..., 1978; Угольная база..., 2004]. Характер распределения угле- и нефтегазоносных формаций различный: нефтегазоносные формации в большинстве случаев подстилают углегазоносные (Ленский, Зырянский, Южно-Якутский и др.), подстилают и чередуются в разрезе (Буреинский, Анадырский, Западно-Камчатский и др.) и нередко переходят одна в другую по площади. Углефтегазоносные бассейны характеризуются высокой метаноносностью угольных пластов, достигающей 20–30 м³/т, и значениями геотермических градиентов 3,0–7,0 °С/100 м. Угленосные толщи являются аккумуляторами, сорбирующими миграционные газовые потоки из нефтегазоносных отложений, с формированием смешанных газов различного происхождения в условиях экранирующего влияния мерзлоты. Подтверждением этому служат показатели изотопного состава углерода $\delta^{13}\text{C}$ метана в углегазоносных бассейнах региона, варьирующих от –23,7 до –94,0 ‰, углекислого газа – от –7,5 до –50,2 ‰, указывающие на присутствие в угленосных толщах газов углеметаморфогенного и биохимического происхождения, а также подстилающих нефтегазоносных отложений [Алексеев и др., 1981; Худяков, 1986; Гресов, 1996, 2011, 2012; Обжиров, Гресов, 2006; Ривкина и др., 2006]. Формирование этого сложного природного газодинамического механизма – аккумуляции в угленосных отложениях полигенезисных газов в условиях экранирующего эффекта ТММП – в углефтегазоносных бассейнах Северо-Востока России является **пятой региональной газогеокриологической закономерностью**.

Шестая региональная газокриологическая закономерность связана с формированием вертикальной газокриологической зональности и сезонной инерционностью процессов выделения метана в подпочвенный слой и воздушную атмосферу. Исследованиями установлено, что весной происходят прогрев и медленное протаивание верхней газокриологической зоны (ВГКЗ, рис. 3) с минимальной ее метановой разгрузкой и постепенным увеличением метановыделения к летнему сезону. Максимум выделений CH_4 наблюдается в сентябре–октябре, минимум – зимой. Горизонты полной деметанизации в исследованных бассейнах практически отсутствуют. В пределах ВГКЗ в интервале глубин 5–25 м установлены свободные газопроявления с концентрациями метана 4–48 % и дебитом газа до 0,90 м³/мин. Содержание CH_4 0,01–47,1 % (до 0,42 м³/т в углях и до 0,03 м³/т во вмещающих породах) фиксировались на глубинах 0,5–25 м. В составе природного газа также присутствуют: CO_2 (от 0,15 до 62,04 %, 0,54 м³/т), углеводородные газы (УВГ) (до C_5 , в сумме до 0,086 %), H_2 (до 0,014 %), Ar и N_2 (от 23,2 до

98,2 ‰). В целом в зоне распространены преимущественно газы метано-углекисло-азотного состава атмосферного, бактериального, биохимического и углеметаморфогенного происхождения с изотопным составом углерода $\delta^{13}\text{C}$ метана Беринговского, Анадырского, Ленского бассейнов – от –42 до –78 ‰, Анюйского (р. Большой Хомус-Юрях) – от –64 до –94 ‰, $\delta^{13}\text{C}$ углекислого газа – от –20,7 до –50,2 ‰ [Худяков, 1986; Угольная база..., 1999; Ривкина и др., 2006; Гресов, 2012]. Исследованиями установлено, что в Беринговском бассейне ежегодные выбросы метана из ВГКЗ в атмосферу, по минимальной оценке, в среднем составляют 42 млн м³, в Аркагалинском – 19, в Буреинском – 168, в Зырянском – 350, в Анюйском – 110, в Южно-Якутском – 750 млн м³, в Ленском – более 3,5 млрд м³; в целом по углегазоносным бассейнам Северо-Востока России – более 4 млрд м³ (около 3,6 млн т) [Худяков, 1986; Гресов, 1996, 2012; Обжиров, Гресов, 2006; Краев, 2010].

Средняя газокриологическая зона (СГКЗ) – основная часть ТММП, характеризующаяся в зависимости от литологического состава отложений слабой или интенсивной трещиноватостью и в то же время низкой степенью льдистости. Она является газомещающей и сама по себе не может препятствовать процессам миграции природных газов. В Беринговском бассейне установлено закономерное возрастание содержаний водорода в угольных пластах СГКЗ и резкое их уменьшение в нижней зоне (НГКЗ) на границе мерзлота–талика. Аналогичный факт установлен в Анадырском, Зырянском и Ленском бассейнах. Распределение H_2 в СГКЗ подтверждает, что средняя криологическая зона является газомещающей [Гресов и др., 2010]. Газонасыщенность СГКЗ обусловлена газопроницаемостью НГКЗ, которая определяется дизъюнктивной нарушенностью, эндогенной, экзогенной и криогенной трещиноватостью углей и вмещающих пород, формой залегания и минерализацией подземных и межмерзлотных вод. В совокупности эти факторы определяют блоковый характер газовой зональности и метаноносности пластов угля, формирование скоплений свободного метана и развитие свободных газопроявлений. Газопроницаемость угольных пластов СГКЗ исследованных бассейнов изменяется от 0,004 до 0,87 мкм², вмещающих пород – от 0,0001 до 0,06, т. е. основными путями миграции (газопереноса) в зоне являются угольные пласты. Концентрации метана в угольных пластах Ленского бассейна варьируют в пределах 7–88 % (0,05–2,84 м³/т), Беринговского – 14–86 (до 3,22), Анадырского – до 48 (до 1,38), Аркагалинского – 4–97 (до 2,34) и Зырянского – 12–90 % (до 3,78 м³/т). В составе газов также присутствуют: CO_2 (от 0,1 до 12,4 %, 0,48 м³/т), H_2 (до 1,1 %), He (до 0,0012 %), УВГ

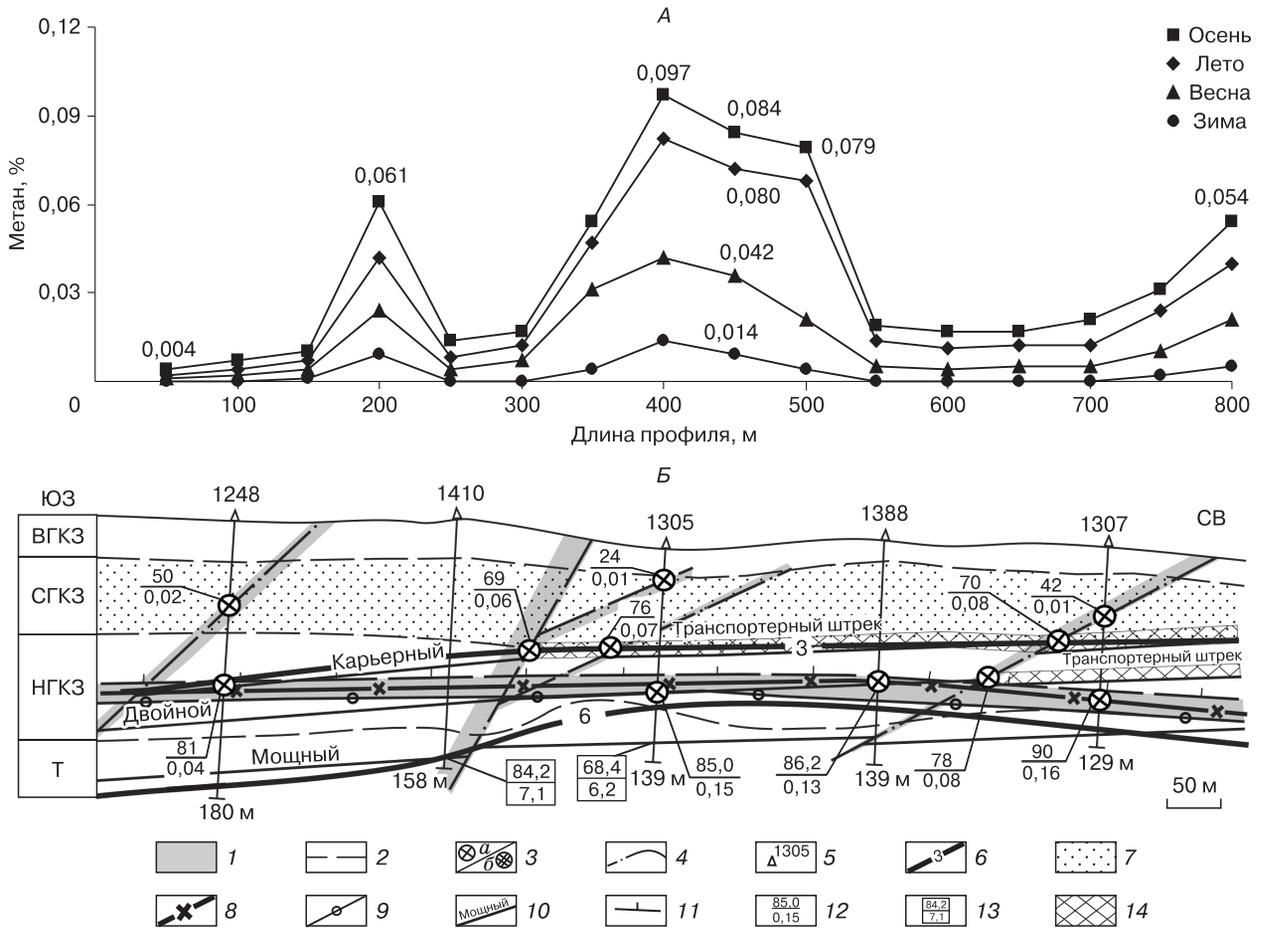


Рис. 3. Газогеохимический профиль сезонных подпочвенных газовых съемок (А) и газокриологический разрез поля шахты Нагорной Беринговского угольного бассейна (Б):

1 – скопления и залежи свободного газа; 2 – границы газокриологических зон: ВГКЗ – верхняя, СГКЗ – средняя, НГКЗ – нижняя, Т – талые породы; 3 – свободные газопроявления (а), суфляры (б); 4 – тектонические нарушения; 5 – разведочная скважина и ее номер, внизу на забое – глубина скважины, м; 6 – изогаса CH₄ (м³/т); 7 – газовмещающий горизонт; 8 – нижняя граница зоны газового выветривания; 9 – гидростатический уровень подземных вод; 10 – угольный пласт и его название; 11 – нижняя граница мерзлоты; 12 – газодинамические показатели свободных газопроявлений и суфляров: в числителе – CH₄, %, в знаменателе – CH₄, м³/мин; 13 – природная метаноносность угольных пластов: в числителе – CH₄, %, в знаменателе – CH₄, м³/т; 14 – подземные горные выработки.

(до С₆ включительно, в сумме до 0,144 %), аргон и азот. В целом в СГКЗ имеют развитие газы азотно-метанового и метанового составов биохимического, углеметаморфогенного происхождения, а также присутствуют газы нефтегазоносных отложений. Изотопный состав углерода δ¹³C метана СГКЗ Ленского, Беринговского, Анадырского, Южно-Якутского, Зырянского бассейнов изменяется от -32,6 до -64,8 ‰, δ¹³C углекислого газа – от -20,5 до -38,9 ‰ [Худяков, 1986; Ривкина и др., 2006; Гресов, 2012].

Нижняя газокриологическая зона имеет распространение в интервале глубин, приуроченных к нижней границе мерзлоты, и характеризуется интенсивной трещиноватостью, которая развивается в сторону как многолетней мерзлоты, так и

отложений с положительными температурами на 20–80 м, обуславливая повышенную проницаемость угленородного массива – горизонта криогенной дезинтеграции.

Газопроницаемость угольных пластов НГКЗ Ленского (Сангарское месторождение), Беринговского (месторождения Бухты Угольной) бассейнов изменяется от 0,004 до 4,8 мкм², вмещающих пород – от 0,001 до 1,06 мкм². Следует отметить, что значения газопроницаемости углей и вмещающих пород, определенные в лабораторных условиях, как правило, на порядок ниже ее показателей, установленных в природных условиях в горных выработках шахт. Данный факт объясняется тем, что в первом случае протекают процессы поровой диффузии газа в однородном монолите, во вто-

ром – поровой, трещинной и смешанного типа в разнородной литологической среде угленородного массива. Концентрации CH_4 в угольных пластах в НГКЗ Ленского бассейна изменяются в пределах 19–98 % (до $3,8 \text{ м}^3/\text{т}$ с.б.м), Беринговского – 32–96 (до 4,2), Анадырского – 17–78 (до 2,4), Зырянского – 48–96 (до 5,8), Аркагалинского – 34–97 % (до $3,4 \text{ м}^3/\text{т}$ с.б.м). В составе газов также присутствуют: CO_2 (от 0,1 до 9,4 %, $0,3 \text{ м}^3/\text{т}$), H_2 (до 0,2 %), He (до 0,0014 %), УВГ (до C_6 включительно, в сумме до 0,23 %), аргон (до 0,72 %) и азот. В целом в НГКЗ распространены смешанные газы углеметаморфогенного (сингенетичные угленосной толще) и глубинного (миграционные) происхождения – подстилающих нефтегазоносных и газонасыщенных отложений. Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ метана первых в НГКЗ изменяется от –27,6 до –67,8 ‰, вторых – от –21,3 до –43,4 ‰ [Алексеев и др., 1981; Худяков, 1986; Гресов, 1996, 2012; Угольная база..., 1999; Обжиров, Гресов, 2006]. Приведенный характер изменчивости газопроницаемости и миграционных процессов из подмерзлотных отложений в зону ТММП подтверждается сочетанием скоплений и залежей свободного газа под мерзлотой и в мерзлоте, указывает на возможность формирования в подмерзлотной зоне (НГКЗ) газогидратных залежей, фактическое присутствие которых установлено в Сангарском районе Ленского бассейна [Гресов, 2012] и углегазоносных бассейнах горных областей северо-западного Китая [Zhu et al., 2010]. Формирование в углегазоносных бассейнах газокриологической зональности, характеризующейся различными газодинамическими, геокриологическими показателями, и сезонная инерционность процессов выделения метана в подпочвенный слой и атмосферу является **шестой региональной газогеокриологической закономерностью**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В общем развитии многолетней мерзлоты Северо-Востока России интенсивно проявляются азональные особенности, не зависящие от географической широты местности и выражающиеся в резкой изменчивости температур мерзлых пород и их мощности на коротких расстояниях, связанной с повсеместным развитием в регионе углегазоносных формаций. Низкая теплопроводность и высокая теплоемкость газонасыщенных угольных пластов – важнейшие факторы, оказывающие влияние на мощность мерзлоты. Показатели теплового и метанового потоков в угленородном мерзлом массиве характеризуются резкой изменчивостью и максимальными значениями в кровле и почве угольных пластов, зонах тектонических нарушений и внедрения магматических образований.

Смещение угленосности в бассейнах в верхние стратиграфические горизонты по направлению к Тихому океану сопровождается переходом зоны сплошного распространения мерзлоты к прерывистой и островной с изменением мощности ТММП от 650–250 до 30–5 м, увеличением степени метаморфизма углей, тектонической нарушенности, сейсмичности и неотектонических процессов, магматизма и вулканизма, геотермического градиента, показателей теплового и метанового потоков.

Толща многолетнемерзлых пород в углегазоносных бассейнах Северо-Востока России подразделяется на три газокриологические зоны: верхнюю, среднюю и нижнюю. Экранирующее влияние мерзлоты благоприятствует формированию в бассейнах газов полигенезисного состава и определяется газопроницаемостью верхней и нижней газокриологических зон.

Геокриологические условия являются одним из основных факторов сохранения газонасыщенности и формирования перспективных для извлечения ресурсов метана углегазоносных бассейнов – крупнейших генерационно-аккумулятивных “хранилищ” метана и источников его выбросов в атмосферу.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-332.2011.5).

Литература

- Алексеев А.Ф., Бодунов Е.И., Лебедев В.С. и др. Органическая геохимия нефтей, газов и органического вещества докембрия // Изотопно-геохимическая характеристика нефтей и газов восточной части Сибирской платформы. М., Наука, 1981, с. 164–175.
- Буров Б.А., Гресов А.И. Влияние залежей углей на процесс деградации многолетнемерзлых пород в шельфовой зоне Арктических морей и выделение метана в водный слой // Докл. РАН, 2011, т. 440, № 2, с. 242–245.
- Высоцкий И.В. Геология природного газа / И.В. Высоцкий. М., Недра, 1979, 392 с.
- Геология и нефтегазоносность Охотско-Шантарского осадочного бассейна / В.Г. Варнавский, А.Э. Жаров, Г.Л. Кириллова и др. Владивосток, ДВО РАН, 2002, 148 с.
- Гресов А.И. Разработка принципов прогнозирования внезапных выделений метана на шахтных полях Дальнего Востока: Отчет о НИР / ВГФ. № ГР 25-93-25/3. М., 1996, 391 с.
- Гресов А.И. Геохимическая классификация углеводородных газов углефтегазоносных бассейнов Востока России // Тихоокеан. геология, 2011, № 2, с. 85–101.
- Гресов А.И. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока России и перспективы ее промышленного освоения. Т. II. Углеметановые бассейны Республики Саха (Якутия) и Северо-Востока / А.И. Гресов. Владивосток, Дальнаука, 2012, 468 с.
- Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В. К вопросу водородности угольных бассейнов Дальнего Востока // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле, 2010, № 1, вып. 15, с. 231–244.

- Инструкция** по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах. М., Недра, 1977, 56 с.
- Краев Г.Н.** Закономерности распространения метана в многолетнемерзлых породах на Северо-Востоке России и прогноз его поступления в атмосферу: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2010, 18 с.
- Матвеев А.К.** Угленосные провинции СССР // Тр. Лаб. геол. угля. Л., АН СССР, 1957, т. 7, 238 с.
- Некрасов И.А.** Криолитозона северо-востока и юга Сибири и закономерности ее развития / И.А. Некрасов. Якутск, Кн. изд-во, 1976, 248 с.
- Нефтегазоносность** и угленосность Тихоокеанского подвижного пояса и Тихого океана: Объясн. зап. к карте. М., НилЗарубежгеология, 1978, 230 с.
- Никитин С.П., Тихонов А.П., Филипов Ю.В.** О перспективах гидратоносности Восточной Якутии // Влияние механических и температурных полей на процессы генерации и аккумуляции углеводородов: Сб. науч. тр. Якутск, Якут. фил. СО АН СССР, 1985, с. 111–120.
- Обжиров А.И., Гресов А.И.** Метан угольных бассейнов и месторождений Дальнего Востока // Геология угольных месторождений: Межвуз. науч. темат. сб. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2006, вып. 16, с. 187–199.
- Региональные** геокриологические исследования в Восточной Азии / Под ред. И.А. Некрасова. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1983, 170 с.
- Ривкина Е.М., Краев Г.Н., Кривушин К.В. и др.** Метан в вечномерзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 3, с. 23–41.
- Руководство** по определению и прогнозу газоносности вмещающих пород угольных месторождений при геологоразведочных работах. Ростов н/Д., ВНИГРИУголь, 1987, 108 с.
- Угольная база** России. Т. V, кн. 2 / Под ред. В.Ф. Череповского. М., Геоинформмарк, 1999, 638 с.
- Угольная база** России. Т. VI / Под ред. В.Ф. Череповского. М., Геоинформмарк, 2004, с. 419–453.
- Фандюшкин Г.А., Гресов А.И.** Тектоногенетическая классификация угольных бассейнов Северо-Востока России // Тихоокеан. геология, 2006, № 6, с. 51–56.
- Худяков В.Н.** Геологические особенности газоносности угольных месторождений Анадырско-Корякского региона: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Ростов н/Д., 1986, 28 с.
- Чернов О.И.** Прогноз внезапных выбросов угля и газа / О.И. Чернов, В.Н. Пузырев. М., Недра, 1979, 296 с.
- Яговкина С.В., Кароль И.Л., Зубов В.А. и др.** Оценка потоков метана в атмосферу с территории газовых месторождений севера Западной Сибири с использованием трехмерной региональной модели переноса // Метеорология и гидрология, 2004, № 4, с. 49–61.
- Herrin J.M., Deming D.** Thermal conductivity of U.S. coals // J. Geophys. Res., 1996, vol. 101, No. B11, p. 25,381–25,386.
- Zhu Y., Zhang Y., Wen H. et al.** Gas hydrates in the Qilian mountain permafrost, Qinghai, Northwest China // Acta Geol. Sinica (English ed.), 2010, vol. 84, No. 1, p. 1–10.

*Поступила в редакцию
22 января 2013 г.*