

ГАЗОВОЕ «ДЫХАНИЕ» КАЛИЙНЫХ НЕДР*



Б.А. Бачурин,
кандидат геолого-
минералогических наук,
заведующий лабораторией
геоэкологии горнодобывающих
регионов,
Горный институт УрО РАН



А.А. Борисов,
младший научный сотрудник,
Горный институт УрО РАН

На основе исследования особенностей приповерхностного газового фона в пределах Верхнекамского месторождения калийных солей обоснована возможность использования методов газогеохимического зондирования для контроля процессов техногенеза в геологической среде.

Открытие академиком В.И. Вернадским явления газового обмена литосферы с атмосферой, названное им «газовым дыханием Земли», послужило теоретической основой использования различных модификаций поверхностных газовых съемок для решения широкого спектра геологических задач. К настоящему времени накоплен довольно значительный опыт использования различных модификаций газовых съемок для решения таких задач, как поиск и разведка нефтяных и газовых месторождений, картирование разрывных нарушений, контроль изменения напряженно-деформированного состояния горного массива, прогноз геодинамических процессов, мониторинг герметичности подземных газохранилищ и др. [1, 6, 7].

Полученная информация свидетельствует, что газы литосферы, являющиеся наиболее мобильным ее компонентом, несут важнейшую информацию об особенностях строения геологической среды и происходящих в ней природных и природно-техногенных процессах. Проведенные исследования показали, что в качестве опорного горизонта при газогеохими-

ческом зондировании наиболее эффективно использование почвенного покрова, который выступает в качестве сорбционного геохимического барьера, перехватывающего миграционные компоненты из нижележащей части разреза. Установлено, что рассеянные в почво-грунтах газы содержат ассоциации миграционных компонентов, генезис которых во многом обусловлен глубинными источниками. В качестве индикаторов данных процессов предложено использование как инертных газов радиогенного происхождения (гелий, радон), так и углеводородных газов (УВГ). Последние особенно информативны в случае наличия в недрах мощных источников углеводородов – залежей нефти и газа, метанонасыщенных угольных и калийных пластов.

Первые попытки внедрения газогеохимических методов в комплекс геолого-геофизических исследований на Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС) относятся к 1988–1989 гг., когда после затопления рудника БКРУ-3 стала очевидна необходимость детального изучения строения надсолевой части разреза с целью выявления различного

* Исследования выполнены при поддержке РФФИ и Администрации Пермского края (проекты 09-05-99023, 11-05-96023).

рода геологических неоднородностей, представляющих потенциальную угрозу для возможного нарушения герметичности водозащитной толщи (ВЗТ). К числу методов, дающих возможность судить о

зов является высокая степень их насыщенности углеводородами (суммарное содержание метана и его гомологов достигает до 15–20 %) и присутствие водорода (табл. 1). Несомненно, что деформация

Таблица 1

Сведения о составе связанных газов соляных пород ВКМКС

Порода	Газонасыщенность, м ³ /м ³	Компонентный состав, об. %				
		СН ₄	Н ₂	СО ₂	Н ₂ S	Н ₂
Карналлит	<u>0,06</u> н.с.	<u>7,0–9,9</u> 8,4	<u>25,5–32,6</u> 29,0	<u>10,6–22,0</u> 16,3	н.с.	<u>38,0–54,1</u> 46,0
Пестрый сильвинит	<u>0,11–0,13</u> 0,12	<u>0,6–5,4</u> 2,8	<u>1,1–14,1</u> 6,3	<u>3,2–15,2</u> 11,2	н.с.	<u>26,0–87,0</u> 73,0
Полосчатый сильвинит	<u>0,08–0,20</u> 0,14	<u>0,7–10,4</u> 3,8	<u>0,2–12,8</u> 5,8	<u>0,5–8,5</u> 4,5	<u>0,1–2,4</u> 0,7	<u>30,0–89,2</u> 68,9
Красный сильвинит	<u>0,02–0,46</u> 0,15	<u>1,8–7,6</u> 4,2	<u>0–22,9</u> 8,6	<u>0,1–8,0</u> 5,0	<u>1,1–8,6</u> 4,8	<u>52,0–85,6</u> 73,4
Каменная соль	<u>0,14–0,20</u> 0,17	<u>7,0–13,0</u> 10,0	<u>2,9–6,7</u> 4,8	<u>0,7–2,4</u> 1,6	<u>0,2–1,5</u> 0,8	<u>52,0–66,4</u> 59,2

Примечание: в числителе – пределы колебаний, в знаменателе – среднее значение; н.с. – нет сведений

флюидопроницаемости различного рода геологических аномалий, относится газогеохимическое зондирование приповерхностной части разреза, направленное на выявление признаков активизации «газового дыхания» недр. В качестве газов-индикаторов наличия подобных зон повышенной проницаемости было предложено использовать гелий и аргон [4]. Возможная информативность последнего основывалась на повышенном содержании в газах калийных пластов радиогенного изотопа аргон-40, являющегося продуктом распада изотопа калий-40. Считалось, что инертность данных компонентов позволяет им легко высвободиться из массива калийных солей и диффундировать в вышележащую часть разреза по зонам повышенной проницаемости ВЗТ. Вместе с тем проходка специальных скважин в районе аварийной ситуации на БКРУ-3 показала, что в составе газопроявлений в надсолевой части разреза фиксируются и повышенные концентрации метана (до 20 %), источником которого также являются соляные породы.

Обобщение имеющейся информации свидетельствует, что суммарное содержание рассеянных и связанных газов в породах галогенных формаций ВКМКС колеблется в пределах 0,024–0,216 м³/м³. Основной особенностью состава данных га-

и разрушение данных пород будет приводить к высвобождению определенного количества связанных газов в свободную фазу и их дальнейшему перераспределению в надпродуктивной части разреза, что позволяет использовать их в качестве индикатора интенсивности данных процессов. Максимальной интенсивности данные процессы будут достигать в случае выщелачивания соленосного массива, когда растворение пород приведет к высвобождению в свободную фазу всех содержащихся в них газах.

Это послужило основой комплексирования при газогеохимических исследованиях водной гелий-аргоновой съемки с изучением углеводородных компонентов водорастворенных и сорбированных газов. Опытные-методические работы, проведенные в пределах затопленного рудника БКРУ-3 и шахтного поля БКРУ-4, показали, что приповерхностный газовый фон достаточно чутко отражает наличие зон повышенной проницаемости надсолевой части разреза и активизацию процессов вертикального массопереноса газовых компонентов, образующихся за счет выщелачивания соляной толщи [4]. Вместе с тем, несмотря на полученные результаты, свидетельствующие о принципиальной возможности использования различных модификаций газовой съемки для уточне-

ния особенностей строения водозащитной толщи и характера ее техногенной трансформации, внедрение этих методов в комплекс производственных геолого-геофизических исследований на Верхнекамском месторождении не произошло. Во многом это было обусловлено высокой трудоемкостью и затратами на реализацию предложенной методики газогеохимических исследований – необходимостью бурения специальных скважин до вскрытия выдержанных водоносных горизонтов, применения специальных герметизированных пробоотборников для отбора проб водорастворенного газа, масс-спектрометрического определения изотопного состава аргона, хроматографического анализа состава сорбированных и водорастворенных газов. Кроме того, определенные трудности возникали с выделением «полезного сигнала» (миграционных газов) на фоне сингенетического газового фона приповерхностной части разреза.

Очередной всплеск интереса к возможному использованию газогеохимических методов на ВКМКС относится к 2006 г. и связан с затоплением рудника БКПРУ-1, когда стала ясна необходимость дальнейшего совершенствования методов контроля за состоянием геологической среды с целью выявления ранних признаков нарушения ВЗТ. Этому способствовала и положительная апробация на территории Пермского Прикамья газоанализатора Escorprobe-5 (производство фирмы RS DINAMICS Ltd, Чехия), позволяющего производить экспресс-анализ состава подпочвенного газа [1]. Сочетание в данном приборе фотоионизационного (ФИД) и инфракрасного (ИК) детекторов позволяет фиксировать в откачиваемых из шпуров или скважин газах концентрацию метана, диоксида углерода, суммарного содержания углеводородов C₁–C₅ (чувствительность 20 ppm) и летучих органических соединений ЛОС (чувствительность 0.0001 ppm) [8]. Высокая аналитическая точность данного прибора в фиксации микроконцентраций газов и возможность получения информации непосредственно в полевых условиях (позволяет в случае необходимости корректировать сеть опро-

бования) делают его использование весьма эффективным. Проведенными опытными методическими исследованиями установлено, что рассеянные (подпочвенный воздух) и сорбированные газы в приповерхностной части разреза формируют территориально сопряженные генетически связанные аномалии, отражающие поступление миграционных компонентов. При этом компоненты подпочвенного газа относительно слабо связаны с минеральной матрицей почвогрунтов и характеризуют «свежее» поступление миграционных соединений, в то время как сорбированные в почвогрунтах газы отражают кумулятивный эффект их накопления за длительный период [1, 2].

При газогеохимических исследованиях в районе аварийной ситуации на БКПРУ-1 в качестве основного параметра, отражающего процессы выщелачивания соленосной толщи, был принят метан, являющийся основным компонентом связанных газов данных отложений и обладающий наиболее высокой миграционной способностью. Контрольное опробование участков, удаленных от зоны аварийной ситуации, показало, что средние фоновые концентрации метана в составе подпочвенного воздуха редко превышают 400 ppm (0,04 %).

Результаты проведенных исследований показали, что выщелачивание солей, результатом которого явилось образование провальной воронки в месте нарушения ВЗТ, привело к высвобождению столь значительного количества газов, что содержание метана в подпочвенном воздухе возросло в данном районе до 2–6 % (3130–41450 мг/м³), а в сорбированных в почво-грунтах газах – до 7,5–20,6 % (рис. 1).

Формирование в почвенном покрове за относительно короткий период (4–5 мес.) столь высококонтрастной газовой аномалии свидетельствует, что наиболее реальным механизмом восходящей миграции высвобождающихся при растворении солей газов является струйный массоперенос в виде микропузырьков по системе взаимосвязанных пор и трещин, что снижает масштабы их растворения в подземных водах.

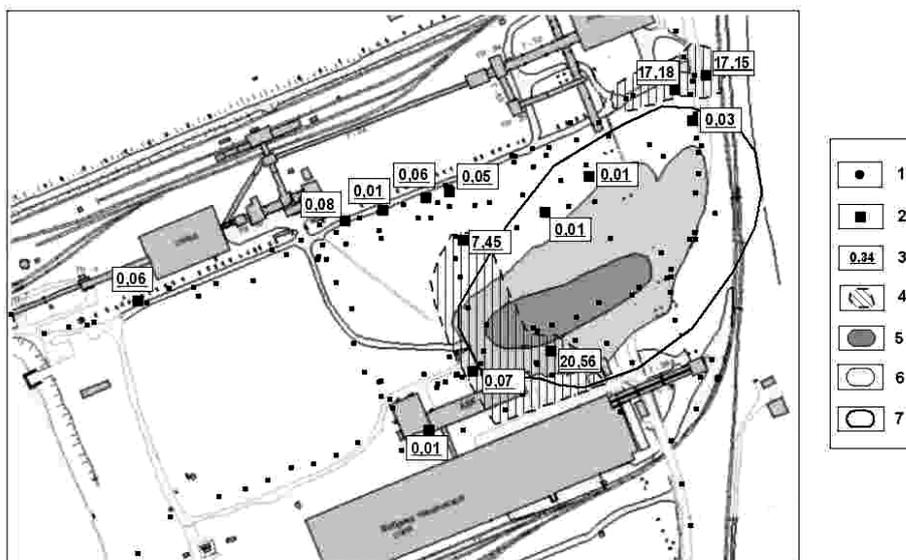


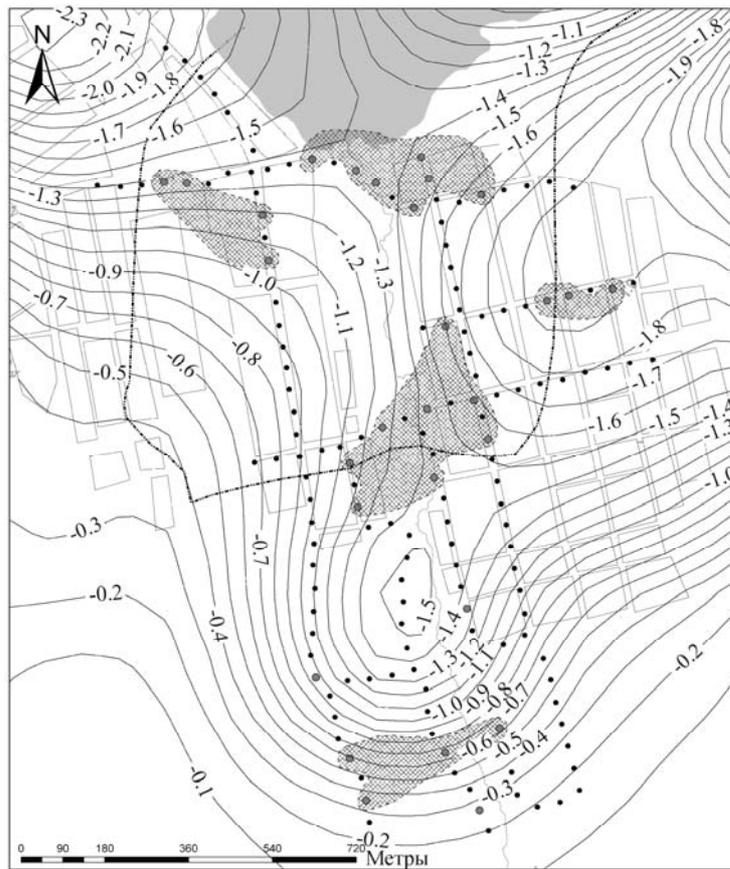
Рис. 1. Результаты газогеохимического опробования района аварийной ситуации на БКПРУ-1. Пункты: 1 – опробования подпочвенного воздуха, 2 – отбора проб почво-грунтов; 3 – содержание метана в составе сорбированных газов, об. %; 4 – зоны стабильно повышенного содержания метана в подпочвенном воздухе; контуры провальной воронки на: 5 – 28.08.07 г., 6 – 27.09.07 г., 7 – 17.01.08 г.

Эффективность предложенной методики газогеохимического контроля за процессами техногенеза в геологической среде ВКМКС получила дополнительную апробацию при выяснении генезиса поверхностных газопроявлений в р. Зырянка, зафиксированных в феврале 2009 года на удалении около 1 км от образовавшейся в зоне аварии провальной воронки. Проведенное с помощью экспресс-газоанализатора Escorprobe-5 обследование данного района показало наличие зоны природной трещиноватости, по которой осуществлялась разгрузка скопившейся в надсолевой части разреза газовоздушной смеси в процессе восстановления сформировавшейся при затоплении рудника депрессионной воронки [3].

Газогеохимическое опробование подработанной территории шахтных полей ВКМКС, проведенное в последующий период, показало, что в условиях сохранности водозащитной толщи основным фактором, приводящим к поступлению углеводородных газов в приповерхностную часть разреза, являются процессы деформации подрабатываемого породного массива. Формирующийся над выработанным пространством приповерхностный углеводородный фон носит мозаичный характер, что отражает различную сте-

пень проницаемости зон техногенной трещиноватости деформируемого надсолевого массива пород, контролирующей интенсивность массопереноса высвобождающихся газов. Зафиксировано, что наиболее активно восходящая миграция газов происходит по зонам, приуроченным к краевым частям мульд оседаний над выработанным пространством [3]. Это приводит к тому, что на этих участках в почвенном покрове формируются относительно стабильные локальные очаги повышенных концентраций углеводородных газов (рис. 2).

Вместе с тем результаты мониторинговых газогеохимических наблюдений свидетельствуют о пульсационном характере газового «дыхания» недр, что обуславливает значительную временную изменчивость приповерхностного газового фона. Появление повышенных концентраций углеводородных компонентов в подпочвенном воздухе, превышающих фоновые значения, фиксируется лишь в отдельные кратковременные периоды (рис. 3). Четких временных закономерностей в изменении содержания углеводородных газов в приповерхностном газовом фоне не выявлено. По всей видимости, интенсивность поступления их в приповерхностную часть разреза контроли-



Условные обозначения:

- | | | | |
|---|--|-----------|---------------------------------------|
| — | изолинии оседаний земной поверхности, зафиксированные в 2009 г. | ■ | условные контуры газовых аномалий |
| • | пикеты газогеохимического опробования | — — — | Предполагаемые контуры газовых шапок: |
| • | пикеты с относительно стабильным повышенным содержанием метана в составе подпочвенного воздуха | — · — · — | пласта В |
| | | — · — · — | пласта КрII |

Рис. 2. Характер приповерхностного газового фона в районе мульды оседания над выработанным пространством рудника БКПРУ-1

руется характером происходящих в породном массиве деформационных процессов, определяющих как масштабы высвобождения связанных газов, так и степень раскрытости и флюидопроницаемости зон природно-техногенной трещиноватости. Влияние экзогенных факторов на приповерхностный газовый фон незначительно: наибольшая изменчивость характерна для содержания в рассеянных газах диоксида углерода, что связано со снижением активности жизнедеятельности почвенной микрофлоры в зимний период; влияние этого фактора на концентрацию углеводородов менее существенно.

Основная часть поступающих в приповерхностную часть разреза миграционных углеводородов сорбируется почвенным покровом и выводится из свободного

газообмена с приповерхностными слоями атмосферы. Это подтверждается опробованием наблюдательных скважин-шпуров, дающих возможность оценки масштабов накопления углеводородов за месячный период: появление метана и его гомологов в свободной фазе подпочвенного газа зафиксировано лишь эпизодически, а их концентрации не превышали 455–630 ppm (0,045–0,063 %). Отсутствие значительного высвобождения газов из почво-грунтов подтверждается и результатами опробования подвальных помещений зданий, расположенных на подработанной территории: из 607 опробованных подвальных помещений в пределах застройки г. Березники присутствие метана в воздухе (102–640 ppm) зафиксировано только в 49 зданиях, причем во многих

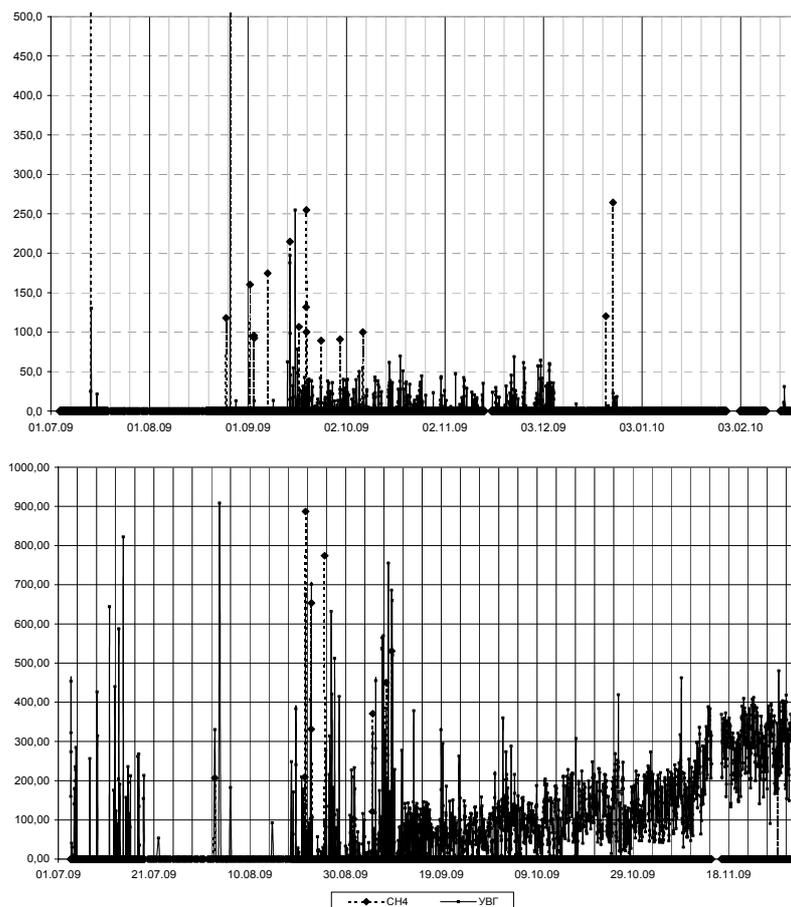


Рис. 3. Динамика изменения концентраций углеводородных компонентов в составе почвенного воздуха (по данным станций автоматизированного мониторинга)

случаях не исключаются бытовые источники его появления.

Положительные результаты апробации методики газогеохимических исследований с использованием экспресс-газоанализатора Escorprobe-5 послужили основой для разработки программы газогеохимического мониторинга, направленной на предотвращение негативных последствий техногенной аварии, вызванной затоплением рудника БКПРУ-1. Основными объектами данного контроля определены участки застроенной территории шахтного поля, где в затопленном выработанном пространстве прогнозируется возможность формирования газозвушных шапок. Согласно расчетным данным, растворение соляных пород приведет к формированию непосредственно под городской застройкой трех газозвушных скоплений объемом около 1,5 млн м³, давление в которых может достигнуть 2,0 МПа. Суммарное содержание горючих газов в данных скоплениях оценива-

ется в 38 %, что значительно превышает взрывоопасные концентрации. Учитывая, что при развитии во времени процессов сдвигения подработанного массива возможно нарушение перекрывающей водо-защитной толщи, не исключается вероятность поступления горючих газов в при-поверхностную часть разреза и их накопление в подвальных помещениях. Для контроля за данными процессами предусмотрено ежемесячное газогеохимическое опробование профилей, пересекающих районы предполагаемого образования газозвушных шапок (рис. 4).

Кроме того, в систему мониторинга включены стационарные пункты наблюдений, представленные неглубокими скважинами и предназначенные для контроля масштабов выделения углеводородных газов из почво-грунтов в свободную фазу. Ряд из них оборудован станциями автоматизированного контроля, разработанными фирмой RS DINAMICS Ltd на базе газоанализаторов Escorprobe-5, позволяю-



Рис. 4. Схема газогеохимического мониторинга за газовоздушными скоплениями в горных выработках: 1 – предполагаемые контуры газовых шапок в продуктивных пластах В (1а) и Кр II (1б); 2 – профили газогеохимического опробования; 3 – станции автоматизированного газогеохимического мониторинга; 4 – наблюдательные скважины

щими производить с заданной периодичностью автоматизированный анализ газа на содержание углеводородных компонентов и осуществлять дистанционную передачу получаемой информации в режиме реального времени на пункт обработки. Принятая система газогеохимического мониторинга позволяет держать под контролем интенсивность «газового дыхания» недр и в случае выявления признаков поступления газов из продуктив-

ной части разреза осуществлять дополнительные мероприятия по локализации очагов данных явлений и оценке их опасности для жизнедеятельности.

Другим направлением использования методики газогеохимического зондирования является контроль за освоением на территории ВКМКС подсолевых залежей углеводородов. Это становится особенно актуальным в связи с планируемой в ближайшей перспективе совместной обработ-

ки на ряде участков запасов калийных руд и нефти. Так, ОАО «Еврохим» ведется подготовка к вводу в эксплуатацию Палашерского участка, где часть планируемых к отработке запасов калийных руд территориально совмещена с контуром разрабатываемого нефтяного месторождения имени Архангельского.

Несмотря на значительный срок эксплуатации нефтяных месторождений на территории Соликамской впадины, в т.ч. в пределах Верхнекамского месторождения, однозначное мнение о характере проявления вертикальных ореолов рассеяния залежей углеводородов в соляной и надсолевой толщах отсутствует. Учитывая значительную мощность (500–700 м) присутствующей в разрезе данной территории нижнепермской галогенной формации, играющей роль регионального флюидоупора, некоторыми исследователями возможность проявления вертикальных ореолов рассеяния залежей углеводородов в калийных пластах и приповерхностной части разреза вообще ставится под сомнение. Вместе с тем имеются сведения о наличии в солях ВКМКС нефтепроявлений различной интенсивности, связываемых с палеоразгрузкой подсолевых флюидов, а некоторые исследователи объясняют этими процессами формирование в калийной залежи очагов газодинамических явлений, осложняющих ведение горных работ [5].

Результаты газогеохимического опробования Палашерского участка показали, что для контура нефтяного месторождения характерны более высокие концентрации углеводородных компонентов в рассеянных и сорбированных в почвогрунтах газах, чем для остальной территории (табл. 2).

Наиболее четко это прослеживается по сорбированным в почво-грунтах газам,

в составе которых отмечается аномально высокое содержание метана и его гомологов (TU_{np}), особенно бутанов (C_4H_{10}) и пентанов (C_5H_{12}), что является характерным признаком ореолов рассеяния залежей углеводородов [6]. Как показывают результаты опробования, данные аномалии носят локальный («точечный») характер и имеют относительно незначительные размеры (рис. 5). Сопоставление результатов газогеохимических исследований с материалами геофизических работ свидетельствует о территориальном совпадении (или сопряжении) большинства аномалий нафтидного типа с выделенными зонами структурно-литологической неоднородности и разуплотнения соляной и надсолевой толщ.

Не останавливаясь на подробном обсуждении возможного механизма формирования аномалий «нафтидного» типа в приповерхностном газовом фоне, выскажем предположение, что они не столько отражают современное «дыхание» залежей углеводородов, сколько являются следствием разгрузки вертикальных ореолов рассеяния, сформировавшихся еще на стадии седиментации галогенной формации. Если принять данный механизм за основу, то данным аномалиям в соленосной части разреза будут соответствовать зоны эпигенетического преобразования пород, обусловленные взаимодействием с миграционными УВ из нижележащей части разреза, включая более высокую их газонасыщенность и присутствие нефтяных микровключений в минеральной матрице.

Реальность высказанного предположения подтверждается изучением соляного керна скважины в пределах контура нефтяного месторождения им. Архангельского, показавшим специфический состав рассеянных газов и органики. Основной особенностью состава газов является вы-

Таблица 2

Характеристика приповерхностного газового фона Палашерского участка ВКМКС

Район	Подпочвенные газы, ppm		Сорбированные газы, 10 ⁻³ об. %			
	CH ₄	УВГ	CH ₄	TU _{np}	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
Месторождение им. Архангельского	0–1513	0–2305	0–1737	0–1,53	0–0,36	0–0,50
	40,4	33,6	44,4	0,37	0,37	0,15
Остальная территория	0–308	0–163	0–1,5	0–0,47	0–0,04	0–0,34
	15,1	10,5	0,17	0,10	0,01	0,08

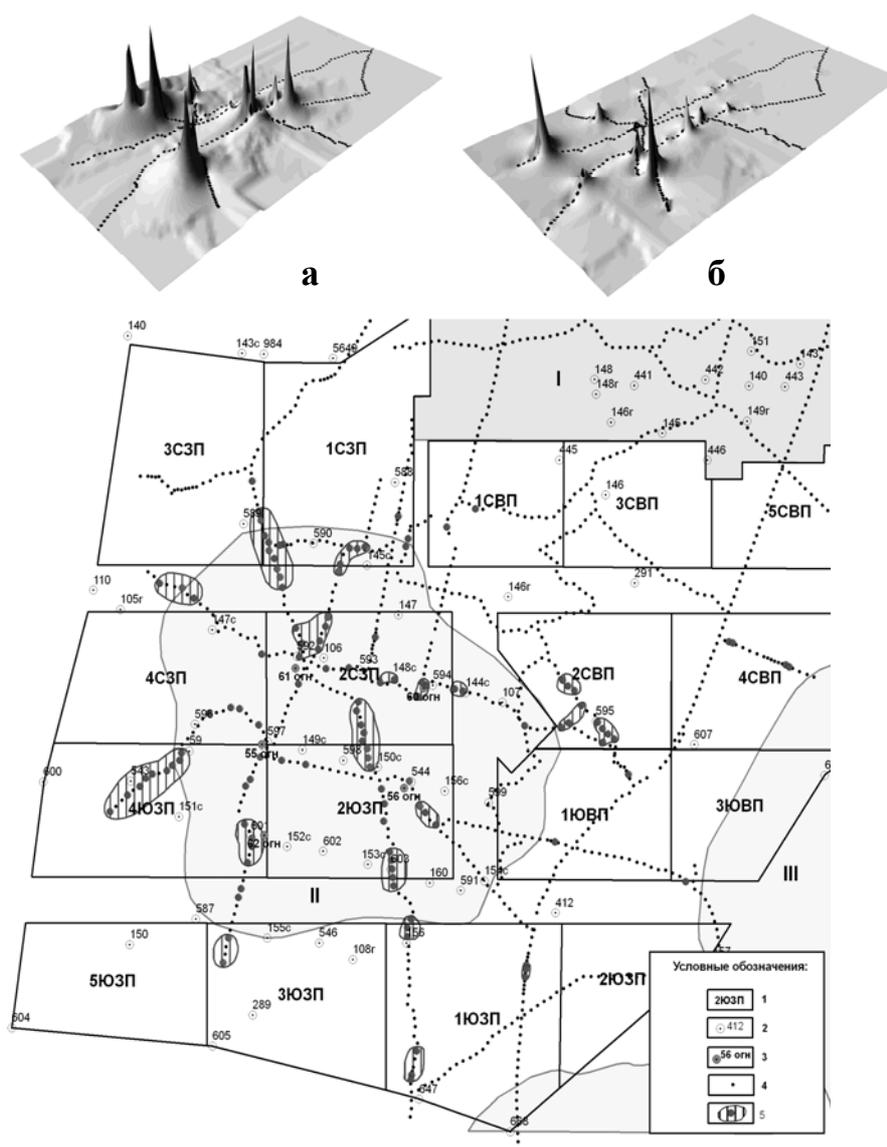


Рис. 5. Характер распределения углеводородных компонентов в рассеянных (а) и сорбированных (б) газах и результаты интерпретации газогеохимической съемки на нефтяном месторождении им. Архангельского: 1 – контуры панелей, проектируемых для подземной отработки калийных солей; 2 – солеразведочные скважины; 3 – нефтяные скважины; 4 – пикеты газогеохимического опробования; 5 – газовые аномалии, отражающие вертикальные ореолы рассеяния залежей углеводородов

сокая степень их насыщенности углеводородами, особенно гомологами метана (этан-пентан), суммарное содержание которых достигает 11,6 %, что значительно выше фоновых концентраций. Битумоиды керна (0,14–0,547 г/кг при фоне не более 0,05 г/кг) представлены преимущественно углеводородными соединениями. По данным хромато-масс-спектрологии, они имеют специфические особенности, характерные для нефтяной органики: набор n-алканов и характер их молекулярно-массового распределения (приурочен-

ность максимумов к C_{16} и C_{19}); набор изоалканов с «нефтяным» типом замещений (монометилзамещенные ряда C_{12} – C_{18}); набор нефтяных УВ, в котором доминируют гибридные метано-нефтяные структуры циклопентанового и циклогексанового типа; обильная ароматика бензольного ряда. Приведенные данные свидетельствуют, что на формирование газов и органики соляной толщи существенное влияние оказали вертикальные ореолы рассеяния подсолевых нефтяных залежей, в связи с чем данные участки могут быть

проблемными с позиций безопасного ведения горных работ. Не исключено, что в процессе разработки нефтяных залежей может произойти активизация вертикального массопереноса углеводородных газов по зонам трещиноватости в надпродуктивную часть разреза, что обуславливает необходимость организации постоянного контроля за газовым «дыханием» недр.

Таким образом, результаты практической апробации методики газогеохимического зондирования на территории ВКМКС свидетельствуют, что данные

методы могут выступать в качестве эффективного инструмента контроля за характером процессов техногенеза в геологической среде, обусловленных освоением калийных солей и подсолевых залежей углеводородов. Сочетание их с используемыми на Верхнекамском месторождении геофизическими методами позволит производить разбраковку выделяемых аномалий строения разреза, оценивать их возможную флюидопроницаемость и выявлять ранние признаки активизации вертикальных перетоков пластовых флюидов.

Библиографический список

1. *Бачурин Б.А.* Теоретические и практические аспекты изучения «газового дыхания» недр // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – Пермь: ГИ УрО РАН. – 2008. – С. 12–15.
2. *Бачурин Б.А., Борисов А.А.* Газогеохимическое зондирование как метод контроля за развитием аварийной ситуации на БКПРУ-1 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 4. – С. 371–378.
3. *Бачурин Б.А., Борисов А.А., Глебов С.В.* Газогеохимический мониторинг процессов техногенеза в геологической среде калийных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 6. – С. 126–132.
4. Информативность газогеохимических исследований при оценке состояния водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении / *Б.А. Бачурин, В.М. Новоселицкий, В.В. Таркашев и др.* // Геология и разведка нефтяных и газовых месторождений: межвуз. сб. науч. трудов. – Пермь: Перм. политех. ин-т. 1990. – С. 95–102.
5. *Кудряшов А.И.* Верхнекамское месторождение солей. – Пермь: ГИ УрО РАН. – 2001. – 429 с.
6. Оценка нефтегазоносности локальных объектов Приуралья по биогеохимическим критериям // *А.А. Оборин, М.А. Шишкин, Б.А. Бачурин* и др. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. – 124 с.
7. *Уткин В.И.* Газовое дыхание недр // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 2. – С. 57–64.
8. *Blaha G., Retief E.* New method and instrumentation for the soil contamination survey (basic introduction) – <http://www.rsdynamics.com>