

# Эманационные и электрические эффекты в атмосфере подпочв над Калужской импактной кольцевой структурой

Н. С. Козлова, В. П. Рудаков, В. Н. Шулейкин, Г. И. Войтов,  
Л. В. Баранова

Институт физики Земли РАН

**Аннотация.** На примере Калужской кольцевой структуры рассмотрены результаты эманационной (водород-тороновой) съемки и съемки нестабильностей электрического поля приземной тропосферы, обусловленные ионизацией приземной атмосферы энергией радиоактивного распада радона и торона, эманлирующих с земной поверхности. Показано, что в рассматриваемых полях проявляется как тектоническое строение собственно кольцевой структуры, так и разломов, формирующих тектонический план северо-западной части Русской плиты. И те, и другие являются путями концентрированных разгрузок природных газов с глубин в область их стока – приземную тропосферу и соответствующего выноса последними аномальных концентраций радона.

## Введение

Эманационная (водород-тороновая) съемка и съемка приземного электрического поля позволяют решать задачи локализации аномального теплопереноса летучих от пород кристаллического основания, залежей нефти и газа, месторождений радиоактивных руд, черных и цветных металлов, мониторинга и т.д. Помимо прямых поисков радиоактивных оруденений эманации урана и тория можно использовать как чувствительные трассеры мест локализации интенсивного теплопереноса природных газов к областям стока последних – приземной атмосфере.

Процессы поисков последних можно существенно интенсифицировать использованием мобильных методов измерений приземного электрического поля, в котором отражаются интенсивные стоки в приземную атмосферу радона, торона и антинона – мощных ионизаторов последней. В предлагаемой работе использованием указанного комплекса делается попытка тектонического расчленения скрытой под 1000-метровым комплексом осадочных пород Калужской импактной кольцевой структуры, про-

являющейся в современном повышенном тепловом потоке, газовом субвертикальном и гидрохимическом потоках.

## 1. Тектоническое положение кольцевой структуры

Калужская кольцевая структура (координаты центральной части  $54^{\circ}40'$  с.ш. и  $36^{\circ}07'$  в.д.) представляет собой округлую впадину, врезанную в породы кристаллического основания на глубину до 500 м, с диаметром 15–17 км. Впадина заполнена аллогенной брекчией и зювитами мощностью до 90 м, обломками осадочных и кристаллических пород, перекрытых терригенно-карбонатными отложениями венда, пярнусских и морсовско-мосоловских слоев наровского горизонта среднего девона и нижнего карбона общей мощностью свыше 1000 м. В центральной части впадины вырисовывается (рис. 1) характерное для импактных структур поднятие с 200-метровым превышением над ее дном и кольцевой цокольный вал шириной до 3,5 км [Масайтус, 1974; Маракушев, 1981; Петров, 1969, 1971].

Структура расположена на северо-западной периклинали Воронежской антеклизы в узле сочленения четырех неактивных глубинных разломов, первый из которых тяготеет к северной части кольцевой структуры. По геолого-геофизическим данным этот разлом трассирует перикратонное опускание вмеща-

©1999 Российский журнал наук о Земле.

Статья N RJE99027.

Онлайновая версия этой статьи опубликована 25 декабря 1999.  
URL: <http://eos.wdcb.rssi.ru/rjes/RJE99027/RJE99027.htm>

ющих кольцевую структуру осадочных пород. Два других разлома (запад-северо-западный Калужско-Бельский и север-северо-восточный Рыльско-Кимрский) образуют тектонопару рифейского заложения, активизированную в фанерозое. Эти разломы контролируют многие локальные структуры платформенного чехла, проявления палеозойского вулканизма, эндогенной минерализации и современной флюидной активности центральной части Русской плиты. Наконец, четвертый разлом, протягивающийся субмеридионально от Курска к Калуге и Твери, является фрагментом Азово-Онежского тектонического линеамента. Он отражается в геофизических и геохимических (в том числе в эманационных) полях, водно-гелиевых аномалиях и неотектонической активности [Петров, 1971].

На фоне относительно слабой геодинамической активности Русской плиты район заложения Калужской кольцевой структуры (и собственно последняя) характеризуется повышенной тектонической расчлененностью и геодинамической активностью недр, самоизливом водно-газовых систем с повышенной гелиеносностью из скважин, локализованных в узлах сочленения кольцевых разломов с линеаментами, определяющими тектонический план северо-западной части Русской плиты. В структуре бурением выделено [Петров, 1969] три системы кольцевых разломов диаметрами 12–14, 22–26 и 36–40 км, причем внутренний из них состоит из двух субпараллельных разрывов [Петров, 1971], по которым центральная часть структуры (Камельгинская мульда) опущена, а архейско-нижнепротерозойский фундамент с внешней стороны структуры приподнят на 150–200 м, образуя кольцевой вал. К южной части кольцевой структуры примыкает узкий блок, опущенный на 270–280 м.

## 2. Несколько слов о природе Калужской кольцевой структуры

Существуют различные мнения о природе Калужской кольцевой структуры. В. Г. Петров [Петров, 1969, 1971], используя геолого-геофизические данные и данные бурения, приходит к выводу о каледонском времени ее заложения в вулканическом процессе, сопровождавшем образование разрывных тектонических структур двух направлений. Однако такой механизм образования кольцевой структуры находится в явном противоречии, в первую очередь, с исключительно гранитной и гранито-гнейсовой брекчией заполнения впадины, врезанной в граниты и гранито-гнейсы кристаллического основания, и явным отсутствием всяких признаков про-

явления глубинных пород основного состава. Напротив, В. Л. Масайтис [Масайтис, 1974, 1975], ссылаясь на результаты микроскопических исследований шлифов брекчий кристаллических сланцев и гранито-гнейсов, обычно раздробленных и катаклазированных с диаплетовым кварцем и плагиоклазом, а также двойников с двупреломлением, смятым биотитом и другими признаками ударного воздействия на среду, классифицирует Калужскую кольцевую структуру как импактное образование. Судя по диаметру (15–17 км) впадины (вреза в породы кристаллического основания), диаметр каменной астроблемы<sup>1</sup> (ударника) мог составить около 1,5 км, а выделившаяся в виде отдельного импульса энергия при столкновении ударника с мишенью при средних для таких астроблем скоростях (порядка 30 км/с) составляет величину порядка  $10^{26}$ – $10^{27}$  эрг [Маркушев, 1981]. Эта энергия реализуется на преобразование пород ударника и мишени в механические (сжатие и дробление) и тепловые (плавление, испарение) процессы. Если учесть, что мишень в момент удара представляла собой область сочленения разнонаправленных региональных тектонических структур более раннего (каледонского) заложения, то единичный энергетический импульс был равноценен нескольким сотням землетрясений магнитудой 7,0–7,5, который мог окончательно сформировать тектонический план кольцевой структуры. Энергия удара, по-видимому, до сих пор определяет тектонический и водно-газовый режим структуры, проявляющийся в минерализации глубинных водно-газовых систем и их гелиеносности [Пронин и др., 1997].

## 3. Методика наблюдений и аппаратура

Настоящее сообщение касается эманационных (радон-торон-актиноновых и водородных) и электрических эффектов в атмосфере почв и подпочв и в приземной тропосфере над Калужской кольцевой структурой, обусловленных процессами субвертикального массопереноса водно-газовых систем с глубин, максимальные проявления которых сосредотачиваются в зонах тектонических разуплотнений, особенно четко выраженных по периметру внутренней кольцевой структуры и в областях пересечения последней региональными разрывами, определяющими структурно-тектонический план северо-западной части Русской плиты.

<sup>1</sup> Следует из того, что брекчия заполнения Калужской кольцевой структуры не содержит надфоновых количеств никеля, хрома, серебра и других химических элементов, характерных для железных и железокремнистых метеоритов.

**Таблица 1.** Состав газов атмосферы почв и подпочв на профилях I-I и II-II (в % по объему)

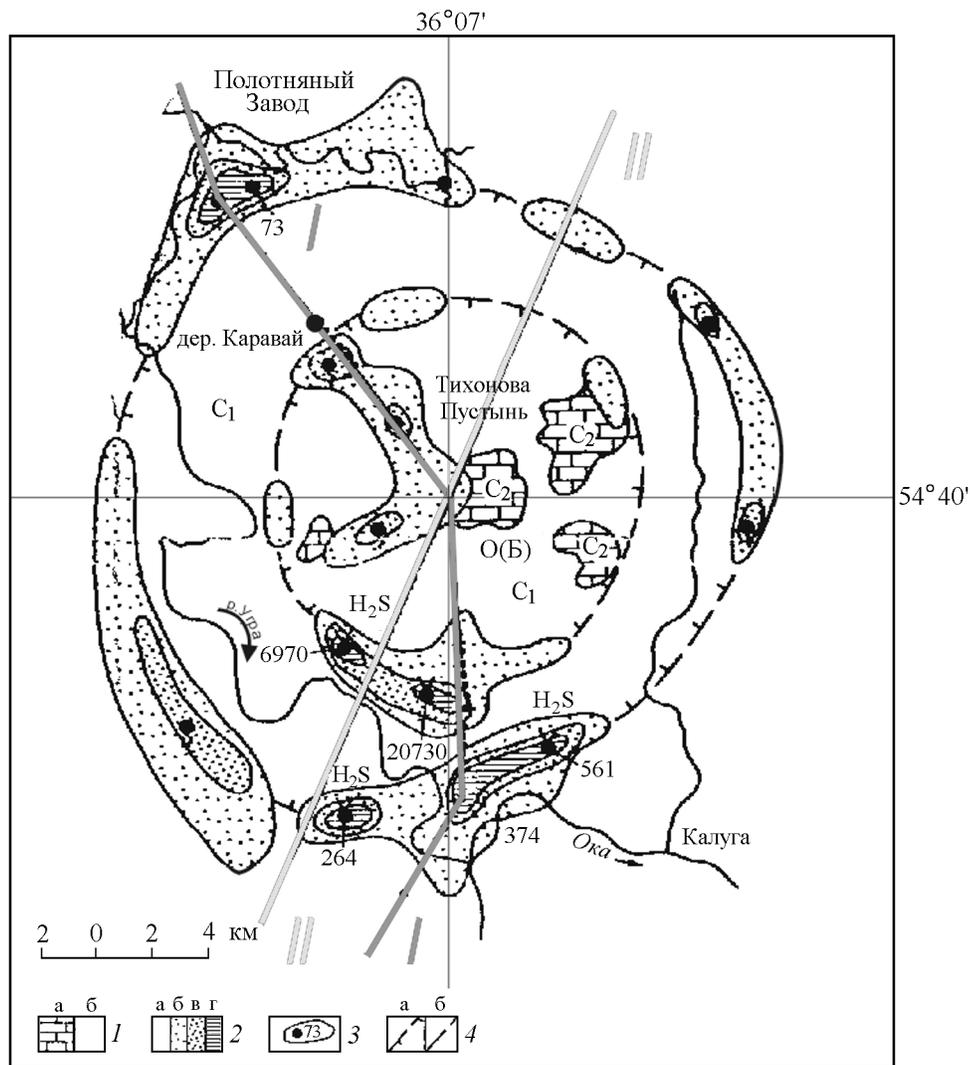
Точка отбора	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Профиль I-I (центр структуры – дер. Каравай)									
6	0,0024	0,00002	0,00005	0,00001	0,00005	следы	0,0042	89,3	10,66
7	0,0002	0,00002	0,00002	0,00003	0,00003	следы	0,0010	94,5	5,66
9	0,0002	0,00007	0,00007	0,00003	0,00004	следы	0,0010	95,52	5,30
Профиль I-I (р. Угра – центр структуры)									
12	0,0042	0,00002	0,000007	следы	нет	нет	0,0047	92,69	7,31
13	0,00027	0,00003	0,00003	0,00002	0,00002	следы	0,001	86,06	13,90
р. Угра									
5	0,0003	0,00002	0,00002	0,00002	0,00001	0,00002	0,0022	93,76	6,41
Профиль II-II									
2	0,0003	0,00037	0,00003	0,00001	0,00014	0,00003	0,001	91,87	7,12
10	0,0041	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,0057	98,29	1,70

Поскольку радиоактивные газы – радон, торон и актинон имеют [Радон, 1955] малые периоды полураспада (радон – 3,825 суток, торон – 54,5 секунд и актинон 3,92 секунды), а их объемные концентрации на 13–16 порядков меньше объемных концентраций любого из тривиальных газов подземных водно-газовых систем (H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, гомологов последнего и т.д.), механизм образования повышенных концентраций эксхалиций в атмосфере почв и подпочв в зоне влияния разрывных тектонических структур можно представить следующим. По мере субвертикального подъема водно-газовых систем в зонах повышенной проницаемости горных пород, растворенные в воде газы стремятся обособиться в самостоятельные фазы и в виде отдельных пузырьков начинают двигаться (всплывать) к поверхности. Подъем пузырьков сопровождается падением давления в их объеме и, соответственно, увеличением поверхностей контакта пузырьков с жидкостью, т.е. газовые пузырьки являются природными дегазаторами, куда стекают наряду с другими газами радон, торон и актинон, образующиеся в подземных водно-газовых системах при распаде растворенных в них радия, тория и актиния. В конечном счете с поверхности уровней грунтовых вод

в рыхлые неоген-четвертичные отложения, а также в отложения почв и подпочв поступают обогащенные эманациями природные газы, состав которых для Калужской кольцевой структуры приводится в табл. 1. Заметим, что он мало отличается от состава природных газов кристаллического основания Русской плиты [Войтов, 1990]. Особенно активно такие процессы создают надфоновые концентрации радиоэлементов над геодинамически активными зонами тектонических разуплотнений с корнями в кристаллическом основании плит.

Водородные и эманационные (радон-тороновые) съемки (рис. 1), как и исследования объемного атмосферного электрического поля (АЭП)<sup>2</sup>, наводимого в приземной тропосфере ионизацией последней распадом радиоэлементов, выполнены летом 1998 г. Измерения водорода и эманаций радона и торона проводились в одном и том же образце газа, отбираемого из атмосферы почв и подпочв. Водород определялся полупроводниковым сенсором на основе Si-SiO<sub>2</sub>-Pd-структуры (чувствительность детектора на

<sup>2</sup>Выполнены на профилях I-I и II-II длиной 20 и 18 км, секущих Калужскую кольцевую структуру и смежные флюидопроницаемые зоны тектонических дроблений



**Рис. 1.** Схематическая карта Калужской кольцевой структуры с нанесенными профилями эманационных и электрических исследований. 1 – а) – известняки, доломиты среднего карбона; б) глины, алевролиты нижнего карбона; 2 – шкала концентраций гелия в подземных водах от 10 мл/л: а) менее 10, б) 10–20, в) 20–40, г) свыше 40; 3 – контуры водно-гелиевых аномалий и концентраций гелия в их эпицентрах в мл/л; 4 – а) – кольцевые и б) линейные активные глубинные разломы. I-I и II-II профили наблюдений радона, водорода и АЭП. 0 – точка пересечения наблюдательных профилей.

уровне воздушного кларка водорода –  $0,5 \times 10^{-6}$  (объемного процента), а радон и торон – модернизированным радиометром “Радон” (чувствительность 2 Бк/л при использованной методике измерений). Кроме того, из некоторых скважин отобраны образцы атмосферы почв и подпочв для хроматографического определения общего состава газов. Объемный заряд приповерхностной тропосферы, инициированный гамма-полем распада радона и торона<sup>3</sup>,

измерялся с борта движущегося по профилю автомобиля, оборудованного датчиком атмосферного электрического поля (АЭП) “Поле-2”, установленным на предельно малой высоте от земной поверхности (10–20 см). Достоверность электрических измерений подтверждалась 2–3-кратным совпадением величины измеряемого параметра на проходимом маршруте.

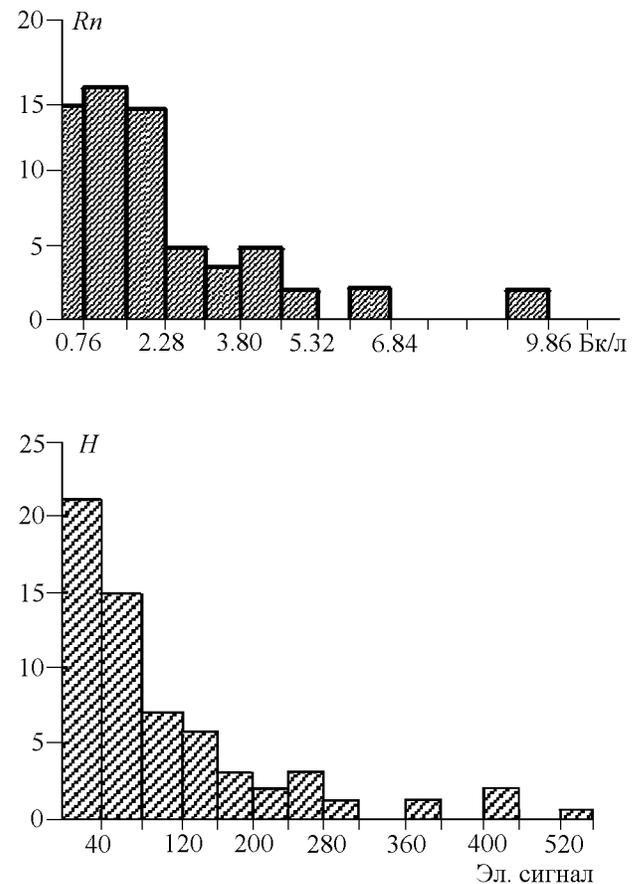
объемного заряда приповерхностной тропосферы (500–600 пар электронов в  $1 \text{ см}^3$  воздуха) поддерживается 8–10 циклами ионизации в  $\text{см}^3/\text{с}$ .

<sup>3</sup>По Дж. Чалмерсу [Чалмерс, 1974] нормальный уровень

#### 4. Обсуждение результатов

Судя по сводным гистограммам рядов распределения концентраций молекулярного водорода и радона в атмосфере почв и подпочв (рис. 2), максимальные потоки этих газов локализованы в тектонически нарушенных структурах, причем водород, обладающий наибольшей теплопроводностью (при  $0^{\circ}\text{C}$   $41,9 \times 10^{-5}$  кал/см·сек·град, что в 7,2 раза больше, чем теплопроводность воздуха) и совершенными диффузионными параметрами, позволяющими ему легко перемещаться в пористых средах, может быть активным газом-носителем для радона и торона при их миграции в область стока-отложения почв и подпочв и приземную тропосферу. На большинстве пунктов измерений концентрации молекулярного водорода в пределах кольцевой структуры не выходят за пределы ее фоновых значений на Русской плите [Войтов и др., 1995]. То же касается потоков радона и торона и, по-видимому, актинона. Эти равновесия нарушаются в областях влияния разломов, ограничивающих кольцевую структуру по периметру, и на секущих кольцевую структуру региональных тектонических разломах (например, север-северо-восточном Рыльско-Кимрском разломе, вдоль которого пройден профиль II-II и в долине реки Угры), где концентрации молекулярного водорода и радона в атмосфере почв и подпочв неизмеримо более высокие, чем на других участках профиля. Особенно велики концентрации молекулярного водорода в зонах тектонических разломов, отчленяющих по периметру кольцевую структуру от вмещающих пород. Эти же зоны характеризуются (рис. 3) повышенным содержанием гелия [Пронин и др., 1997] в водах извлекающих скважин и источниках минеральных вод и относительно высоким содержанием в составе атмосферы почв и подпочв водорода и углеводородов ряда метана (табл. 1).

Вариации АЭП над Калужской кольцевой структурой представлены на рис. 3, 4. Заметим, что помимо вариаций приземного объемного заряда на текущее значение АЭП влияют изменения метеорологических параметров [Parkinson, 1958; Piersе, 1958]. Поэтому для повышения достоверностей результатов наблюдений сокращались как время их проведения, так и длины отдельных маршрутов, что давало возможность проводить повторные наблюдения на выбранных маршрутах. Расчетные коэффициенты корреляции между измеренными значениями эксхалций радона и торона и АЭП на профиле I-I и II-II составляют 0,87 и 0,37, соответственно. Заметим, что сравнительно низкий коэффициент корреляции параметров на последнем профиле, по-видимому,



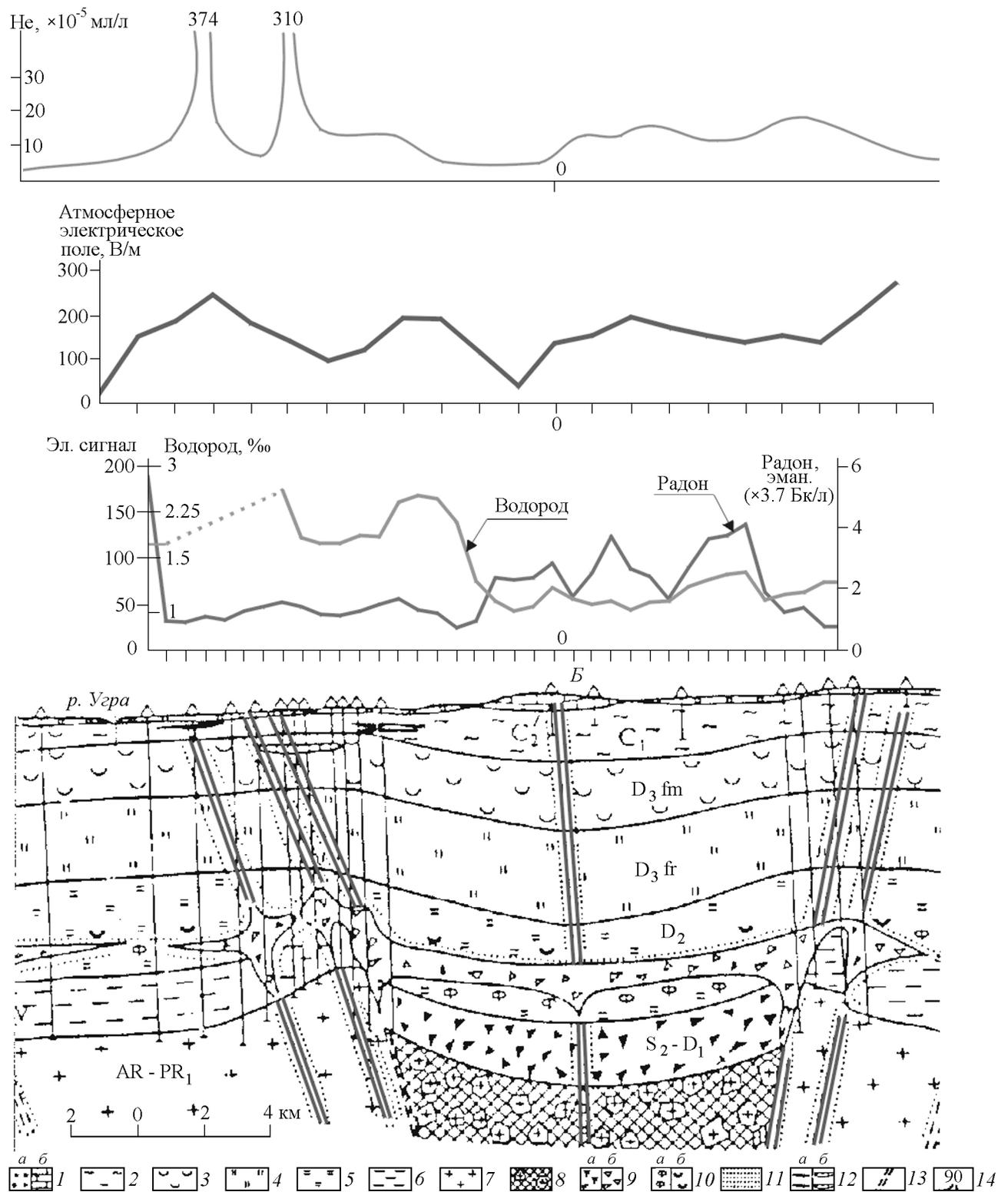
**Рис. 2.** Гистограммы рядов распределения концентраций водорода и радона в образцах атмосфер почв и подпочв, отобранных на профилях I-I и II-II Калужской кольцевой структуры.

обусловлен локальными метеорологическими условиями, в частности – турбулентностью приземной тропосферы в период наблюдений.

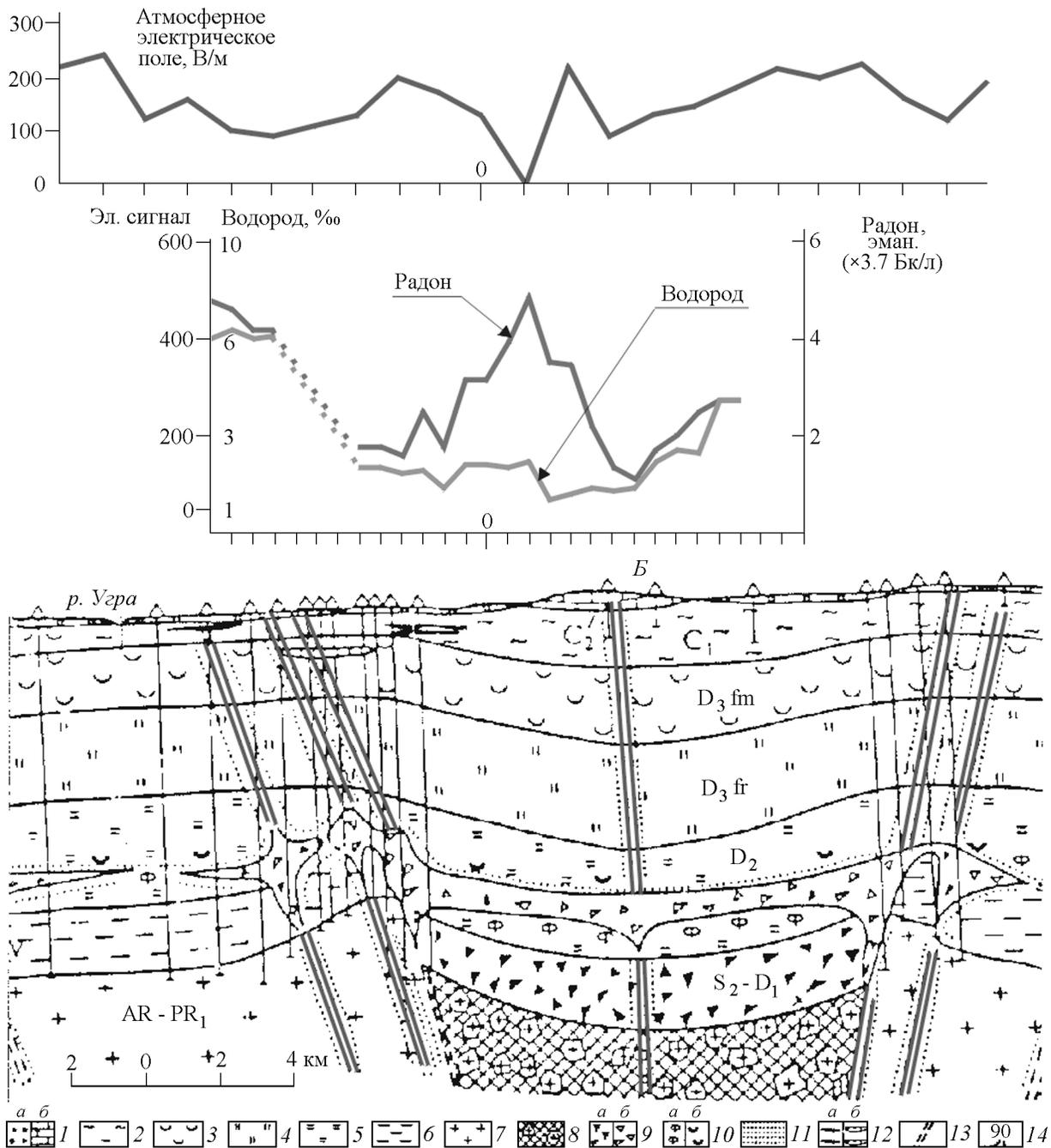
#### Выводы

Исходя из изложенного, можно сделать несколько выводов:

- несомненна глубинная природа молекулярного водорода, проявляющегося в тектонически разуплотненных породах кристаллического основания и осадочного чехла, где зарегистрированы его надфоновые концентрации в атмосфере почв и подпочв,
- тривиальные газы –  $\text{H}_2$ , He,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и др. играют определяющую роль в переносе эманаций радиоэлементов в природе, в том числе в пределах кольцевых разломов, возникающих по периметру импактных структур, влияющих на динамику процессов перераспределения потоков летучих глубинного генезиса в литосфере,



**Рис. 3.** Геологический разрез через Калужскую кольцевую структуру по профилю I-I: ход атмосферного электрического поля, ход радона и водорода (сглаженный по скользящим из трех последующих значений концентраций), ход гелия по данным [Пронин и др., 1997]. Обозначения 1-14 те же, что и на рис. 4.



**Рис. 4.** Геологический разрез через Калужскую кольцевую структуру по профилю П-П: ход атмосферного электрического поля, ход радона и водорода. Обозначения: 1 – четвертичные отложения (а) и известняки, доломиты среднего карбона (б); 2 – глины, алевролиты нижнего карбона; 3 – карбонатные отложения фаменского яруса верхнего девона с горизонтами и вкрапленностью гипса, кремнистого вещества, доломита; 4 – алевролиты, глины, известняки и доломиты франского яруса верхнего девона; 5 – глины, алевролиты, песчаники среднего девона; 6 – вендские аргиллиты, песчаники, туффиты с глауконитом, углеродистым веществом; 7 – гнейсы, гранито-гнейсы и граниты архея и нижнего протерозоя; 8 – аутигенные брекчии гнейсов, гранито-гнейсов и гранитов; 9 – аллогенные, взрывные и пирокластические брекчии с эффузивами среднего и основного состава (а) и флюидизированные брекчии осадочных и других пород с ангидрит-карбонатно-кремнистым цементом (б); 10 – фосфориты (а) и сульфаты (б), сингенетичные с осадочными породами; 11 – гидротермально измененные породы; 12 – залежи бурого угля (а) и гипса (б); 13 – активные глубинные разломы; 14 – график содержания гелия в подземных водах.

в) образование кольцевых тектонических разломов в породах литосферы и последующего участия этих разломов в надфоновых разгрузках летучих в приземную тропосферу свидетельствует об их атроблемной природе.

Полученные результаты позволяют также говорить о доминирующей роли субвертикальных потоков летучих в выносе в атмосферу почв и подпочв и в приповерхностную тропосферу радиоактивных эманаций, определяющих ионизационное состояние последней. В геодинамически активных областях восстающие потоки природных газов, а, соответственно, и их радиоактивных составляющих, существенно плотнее потоков природных газов в пределах плит и щитов и более нестабильны во времени [Войтов, 1998; Войтов и др., 1995; Дианов-Клоков и др., 1977], что провоцирует нестабильности в этих регионах электрических характеристик приземной тропосферы.

## Литература

- Войтов Г. И., Восстановленные газы (углеводороды) в породах фундамента Русской плиты, *Бюлл. МОИП, отд. Геологическое*, 61, 44–61, 1990.
- Войтов Г. И., Николаев И. Н., Уточкин Ю. А. и др., О потоке водорода в приземную тропосферу в геодинамически различных геоструктурных зонах Земли, *ДАН*, 344, (1), 110–114, 1995.
- Войтов Г. И., Мониторинг радона атмосферы подпочв сейсмически активной Средней Азии, *Физика Земли*, (1), 27–38, 1998.
- Дианов-Клоков В. И., Лукшин В. В., Матвеева О. А., Скляренко И. Я., О распределении метана в тропосфере, *Изв. АН СССР, Сер. Физика атмосферы и океана*, 13, (5), 529–536, 1977.
- Кароль И. Л., *Радиоактивные изотопы и глобальный перенос в атмосфере*, 66 с., Гидрометиздат, Ленинград, 1972.
- Масайтис В. Л., Некоторые древние метеоритные кратеры на территории СССР, *Метеоритика*, вып. 33, 64–68, 1974.
- Масайтис В. Л., Астроблемы на территории СССР, *Сов. геология*, (11), 52–64, 1975.
- Маракушев А. А., *Импаكتиты*, с. 240, Изд-во МГУ, Москва, 1981.
- Петров В. Г., Особенности строения Калужской структуры, *Бюлл. МОИП, отд. Геологическое*, 44, вып. 6, 1969.
- Петров В. Г., О выделении Калужско-Бельской структурной зоны, *Бюлл. МОИП, отд. Геологическое*, 46, вып. 3, 1971.
- Пронин А. П., Башорин В. Н., Звонилкин Б. Д., Геологическое строение и флюидная активность Калужской кольцевой структуры, *ДАН*, 356, (1), 78–82, 1997.
- Радон*, Большая советская энциклопедия, с. 584, Из-во БСЭ, Москва, 1955.
- Чалмерс Дж. А., *Атмосферное электричество*, с. 422, Гидрометиздат, Ленинград, 1974.
- Parkinson W. D., Factors, controlling the atmospheric conductivity at the Huankayo Magnetic Observatory, *Terr. Magn. Atmos. Elect.*, 3, 305–317, 1958.
- Pierse E. T., Some topics in atmospheric electricity, *Rec. Adv.*, 5–16, 1958.

(Поступила в редакцию 15 ноября 1999.)