

УДК 531.594

## ДИНАМИКА ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ И АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

© 2017 г. В.Н. Шулейкин

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия

Наблюдения за вариациями атмосферного электрического поля, содержанием радона в почве и в приповерхностных слоях атмосферы, гидрогеологическими процессами позволили установить связи между перечисленными параметрами. Подъем уровней водоносных горизонтов увеличивает вынос почвенного радона, что вызывает спад атмосферного электрического поля; спад уровней приводит к обратным эффектам. Причиной подъема может быть инфильтрация осадков, гидроразрыв, понижение атмосферного давления; причиной спада – откачка артезианских вод, рост атмосферного давления.

*Ключевые слова:* атмосферное давление, атмосферное электрическое поле, радон, уровень водоносных горизонтов.

PACS 92

### Введение

Объемный заряд приземного воздуха обязан своим происхождением ионизации эксхалирующим почвенным радоном [Тверской, 1951; Френкель 2009]. Высокий молекулярный вес радона  $Rn^{222}$  исключает возможность его самопроизвольной субвертикальной миграции. Долгое время считалось, что перенос ионизатора в приповерхностные слои грунта и атмосферу осуществляется пузырьковыми образованиями всех летучих газов почвенного воздуха [Войтов и др., 1999; Гергедава и др., 2001]. Эксперименты последних лет показали, что в качестве газов-носителей выступают только два – водород и метан [Зубарев, Шулейкин, 2009; Шулейкин и др., 2015]. Полученный результат позволил построить модельное приближение связей газовых и электрических характеристик Земли и атмосферы.

Субвертикальный поток водорода и метана захватывает атомы радона с глубины 4–6 м и выносит их в приповерхностные слои грунта и атмосферу, где радиоактивный газ становится единственным естественным ионизатором воздуха [Баранов, 1956; Шулейкин, 2013а]. Образующие при этом легкие ионы определяют полярные проводимости

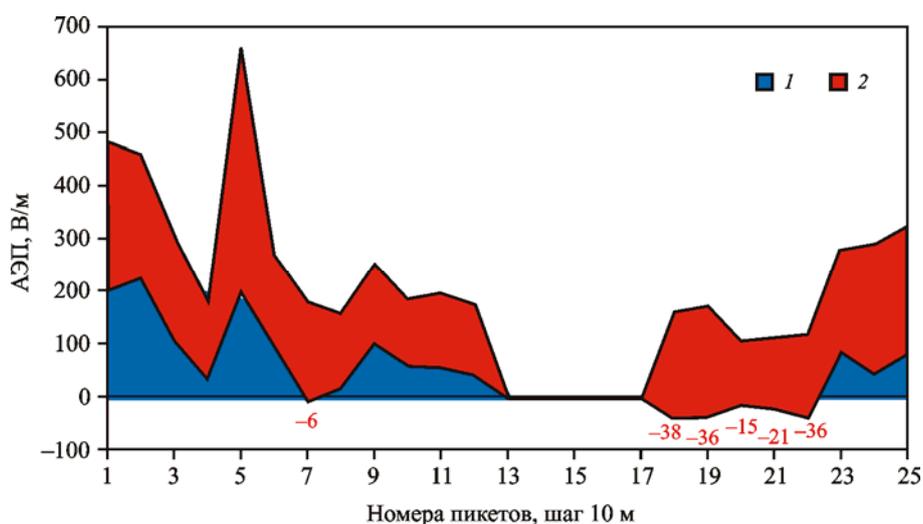
воздуха; их рекомбинация с нейтральными ядрами конденсации приводит к образованию тяжелых ионов, определяющих атмосферное электрическое поле (АЭП). При дефиците ионизатора имеет место классический электродный эффект – плавный спад поля с выходом на нормальный фоновый уровень [Редин, 2011]; при избытке – реверсивный электродный эффект, проявляющийся в спаде поля порой до отрицательных значений, его перегибе и последующем росте до фонового уровня [Редин, 2011; Шулейкин, 2013б].

Поскольку среднее содержание радона в грунте не менее чем в 100 раз превышает содержание радона в атмосфере [Сисигина, 1962, 1965], изменение выноса ионизатора в атмосферу в 2 раза практически не скажется на концентрации радона в грунте. Однако в приповерхностной атмосфере подобные изменения приведут к двукратному изменению поля и полярных проводимостей. Это значит, что элементы приземного атмосферного электричества крайне чувствительны к изменению плотности субвертикального потока газов-носителей – водорода и метана.

Поровое пространство приповерхностных слоев грунта заполнено почвенными газами и водой. Изменение динамики водоносных горизонтов неизбежно меняет интенсивность воздухообмена почва–атмосфера, а следовательно и режим эксхалации почвенного радона. В конечном итоге это приводит к вариациям объемного заряда приземного атмосферного воздуха. Рассмотрим серию экспериментальных исследований, иллюстрирующих связь элементов приземного атмосферного электричества с гидрогеологическими процессами.

### Результаты наблюдений на оползне

В июне 2004 г. на оползне у южной окраины хут. Усть-Невинский (Ставропольский край) проводились комплексные наблюдения АЭП, радона и водорода почвенного воздуха. В период 02–04.06.2004 г. шли проливные дожди, стимулирующие инфильтрацию воды вниз по склону и в том числе по подошве оползня. Эксперимент был начат 06.06.2004 г. на профиле длиной 240 м, секущем сверху вниз тело оползня. Измерения проводились в 25 точках (пикетах) с шагом 10 м (рис. 1) с помощью установленного на колесной платформе флюксметра «Градиент» с высотой измерительных пластин ~0.6 м.



**Рис. 1.** Результаты наблюдений АЭП 6 (2) и 10 (1) июня 2004 г. по профилю, секущему сверху вниз тело оползня (южная окраина хут. Усть-Невинский, Ставропольский край)

При средней длине исследуемого оползня ~150 м перепад высот между бровкой ниши отрыва и подножьем оползня – около 30 м. Выше по склону перепад высот сохраняется. На пикетах 13–17 наблюдения не проводились, поскольку они пришлись на заросший лесом участок, где АЭП экранировалось кустами и деревьями. На пикетах 7 и 18–22 был зарегистрирован спад поля со сменой знака: пикет 7 располагался на заболоченном участке тела молодого, активного оползня; пикеты 18, 19 находились в конце тела древнего оползня; пикеты 19–22 – на надпойменной террасе р. Кубань.

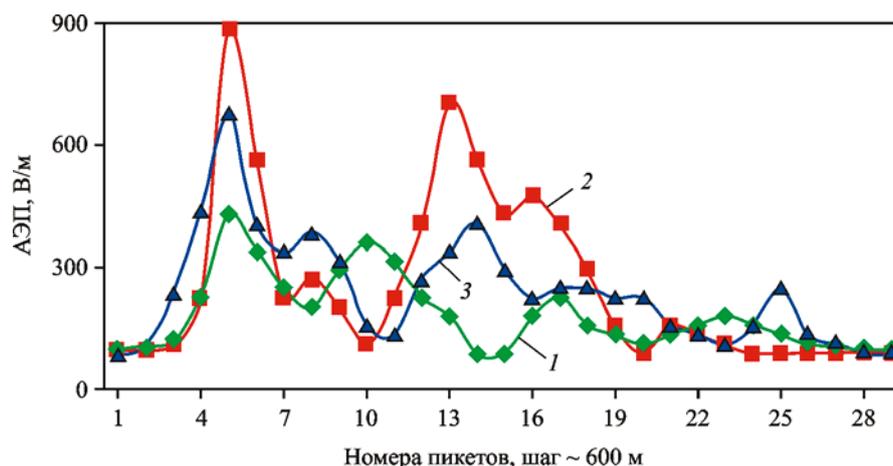
На пикетах 7, 18–22 06.06.2004 г. взять образцы почвенного воздуха не удалось – на глубине 0.2–0.3 м в скважинах стояла вода. Повторные измерения АЭП проводились 10.06.2004 г., когда инфильтрация воды вниз по склону практически закончилась. АЭП поменяло знак; средний фоновый уровень на пикетах 1–12 составлял  $E_{1-12} = 199$  В/м, на пикетах 18–25 –  $E_{18-25} = 187$  В/м, т.е. был практически одинаковым (см. рис. 1).

Из приведенных на рис. 1 данных видно, что разность между значениями поля по мере спуска по склону заметно увеличивается: по группе пикетов 1–12 ее среднее значение  $\Delta E_{1-12} = 97$  В/м; по группе пикетов 18–25 –  $\Delta E_{18-25} = 178$  В/м. Полученный результат, с физической точки зрения, понятен: в первую очередь обезвоживается верхняя часть склона. Результаты измерений подтверждают высокую чувствительность АЭП к глубине залегания грунтовых вод и их динамике. Как и в случае микросейсмического воздействия [Шулейкин и др., 2015], сам процесс стока воды по трещинам и поровому пространству тела оползня инициирует субвертикальную миграцию радона. На оползне, в местах близкого подхода грунтовых вод к поверхности, наблюдается максимальная эксхалация радона, что и приводит к отрицательным значениям поля – ярко выраженному реверсивному электродному эффекту [Редин, 2011; Шулейкин, 2013б]. Следует подчеркнуть, что пикет 7 расположен на заболоченном участке, где следует ожидать избыточного сброса биогенного метана (газа – носителя ионизатора) [Шулейкин, Щукин, 2015].

### Результаты наблюдений над эксплуатационным горизонтом

Рассмотрим результаты профильных наблюдений АЭП над депрессионной воронкой городской водозаборной станции (глубина эксплуатационного горизонта – ~80 м при мощности ~30 м, г. Светлогорск, Белоруссия). В экспериментах использовались два измерительных прибора – стационарный и мобильный флюксометры «Поле-2»: стационарный флюксометр непрерывно работал в контрольной точке на полигоне «Узнож»; мобильный прибор устанавливался на крыше автомобиля УАЗ-452 (высота измерительных пластин – порядка 2.3 м) и использовался для контроля АЭП на трассе Узнож–Светлогорск. На рис. 2 приведены примеры вариации поля в течение дня (утро, полдень, вечер) на профиле длиной 17.2 км, зарегистрированные при фоновом уровне сигнала в контрольной точке ~90–100 В/м.

Пиковые амплитуды поля в непосредственной близости от водозаборной станции (пикет 5, 2.4 км от начала профиля) достигают до величин ~400, 900 и 600 утром, днем и вечером соответственно. Причина столь высоких значений поля – депрессионная воронка, образовавшаяся в пласте в ходе городского водозабора. Воронка вытянута в направлении Светлогорск–Узнож. Создаваемое разряжение минимизирует воздухообмен почва–атмосфера, приводит к спаду эксхалации почвенного радона и высоким значениям поля – ярко выраженный классический электродный эффект [Редин, 2011].

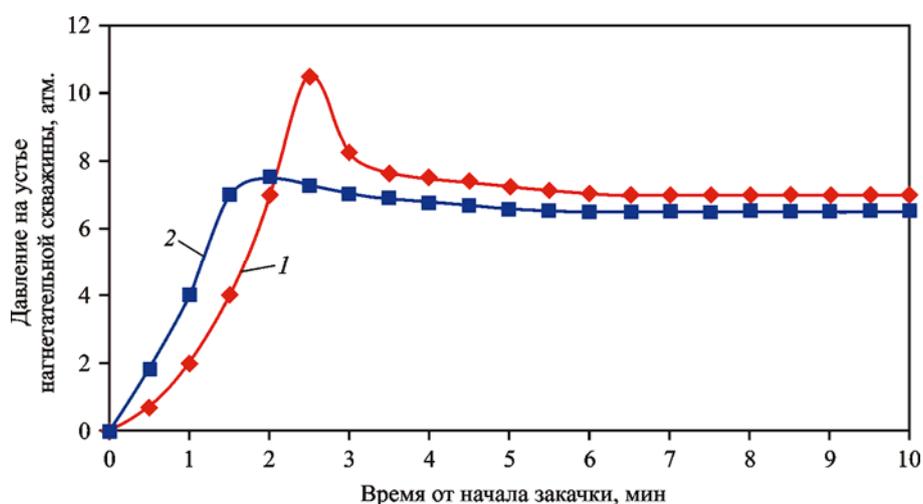


**Рис. 2.** Пространственные вариации АЭП в течение дня по трассе Светлогорск–Узнож (Белоруссия) над зоной городского водозабора  
1 – утро; 2 – полдень; 3 – вечер

### Результаты наблюдений над зоной гидроразрыва

Следующий эксперимент демонстрирует вариации АЭП при обратной процедуре – закачке флюида в грунт. Исследования проводились в июне 1991 г. на станции захоронения радиоактивных отходов под г. Загорск (ныне – г. Сергиев Посад). Геологический разрез участка исследований до глубин  $\sim 70$  м представлен плотными четвертичными суглинками московской и днепровской морен. В нагнетательную скважину глубиной 50 м закачивался контрольный флюид – вода, со скоростью  $\sim 1$  м<sup>3</sup>/мин. Давление в ходе закачки контролировалось манометром, установленном на устье нагнетательной скважины. На рис. 3 показано изменение давления в ходе циклов закачки 1 и 2.

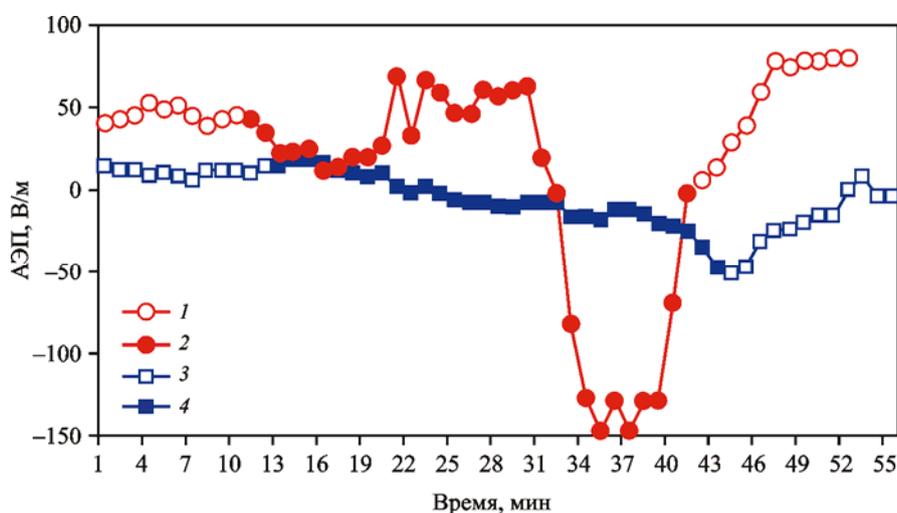
По скачку давления видно, что гидроразрыв образуется примерно через 2.5 мин после начала работы при давлении порядка 10.5 атм на устье скважины и 15.5 атм – в зоне



**Рис. 3.** Вариации давления на устье нагнетательной скважины станции захоронения радиоактивных отходов (г. Загорск, июнь 1991 г.) в ходе двух циклов закачки 1 и 2  
1 – закачка 1 (E1); 2 – закачка 2 (E2)

гидроразрыва. Затем следует спад давления на величину  $\sim 2.5$  атм с выходом на постоянную величину на уровне  $\sim 7.0$  атм до конца закачки. В цикле закачки 2 максимум давления меньше, чем в цикле 1, и составляет  $\sim 7.5$  атм, наступая несколько раньше – примерно через 1.5 мин после начала процедуры.

На рис. 4 представлены временные вариации АЭП, зарегистрированные у устья нагнетательной скважины флюксометром «Поле-2», установленным на земле; высота измерительных пластин –  $\sim 0.4$  м. В вариациях поля после первой закачки можно выделить 4 этапа. Сразу после начала закачки наблюдается спад поля от фонового уровня 40–50 В/м до 10–15 В/м. Причин тому несколько: сжатие порового пространства покрывающих пород, сопровождаемое техногенным сейсмическим шумом от установленного в непосредственной близости от скважины работающего компрессора, что провоцирует повышенную эксхалацию радона; ударное воздействие гидроразрыва, в результате чего в приземную атмосферу поступают отрицательно заряженные пылевые образования.



**Рис. 4.** Вариации АЭП на территории станции захоронения радиоактивных отходов (г. Загорск, июнь 1991 г.) в ходе двух циклов закачки флюида объемом  $30 \text{ м}^3$  в грунт на глубину 50 м

1 – фон перед закачкой 1; 2 – закачка 1 (E1); 3 – фон перед закачкой 2; 4 – закачка 2 (E2)

На рис. 4 видно, что наступает резкий спад сигнала со сменой знака поля до величин порядка  $-150 \div -140$  В/м примерно на 20-й минуте от начала закачки. Это результат резкого сжатия порового пространства покрывающих пород, сопровождаемого мощным импульсным выбросом ионизатора в момент образования гидроразрыва. Избыток эксхалирующего радона в приповерхностной атмосфере приводит к реверсивному электродному эффекту [Редин, 2011; Шулейкин, 2013б].

Локальное атмосферное электрическое поле в точке измерений определяется концентрацией тяжелых ионов, время жизни которых 40–50 мин [Тверской, 1951]. После начала закачки E1 (11–12-я минуты записи на рис. 4) спад поля со сменой знака происходит на 34–35-й минутах, т.е. через интервал, сравнимый с половиной жизни тяжелых ионов. Естественно, что при кратковременном, импульсном выбросе ионизатора максимальная концентрация тяжелых ионов будет достигаться именно на середине их жизни. Похожий результат описан в работе [Кутцов и др., 2007], где причиной выброса ионизатора был не гидроразрыв, а резкое увеличение уровня сейсмоакустических шумов.

Примерно на 47–48-й минутах после начала закачки значение АЭП возвращается на фоновый уровень, практически в 2 раза больший, чем до закачки. В результате импульсного выброса радона при гидроразрыве концентрация ионизатора в приповерхностных слоях грунта заметно уменьшилась, что и привело к росту фонового значения АЭП после активного воздействия.

Следует заметить, что эксперимент проводился в конце рабочего дня, и, согласно условиям работы на территории предприятия, измерительный инструмент нельзя было оставить на непрерывную регистрацию. Запись поля следующим утром (см. рис. 4, закачка 2) показала, что за 15 ч после первой закачки фоновый уровень поля упал до  $\sim 10$  В/м. В это время шла активная инфильтрация воды из зоны гидроразрыва по трещинами и поровому пространству покрывающих пород, следствием чего явился много-часовой рост эксхалации ионизатора, который и привел к спаду АЭП.

Повторная закачка  $30 \text{ м}^3$  воды в зону гидроразрыва вызвала близкие по форме вариации поля, но на меньших амплитудных перепадах. Если в ходе первой закачки отношение минимальных отрицательных полей к фону до начала цикла составляло  $\sim(-4)$ , то во время второй закачки оно практически не изменилось –  $\sim(-4 \div -5)$ . Поскольку существовал гидроразрыв, деформационные процессы не носили импульсный характер, а шли по мере заполнения и расширения существующей трещины. В результате максимум АЭП наступает несколько позже – на 30-й минуте после начала закачки.

К сожалению, на месте проведения наблюдений не было возможности провести контроль радиационного фона из-за отсутствия измерительного инструмента. Последующий опыт работы на загрязненной территории Белоруссии летом 1986 г. после аварии на Чернобыльской АЭС показал, что при загрязнении территории цезием поля  $\sim(30-50)$  В/м соответствуют уровню радиации  $\sim(50-60)$  мкР/ч.

### Результаты наблюдений при вариациях атмосферного давления

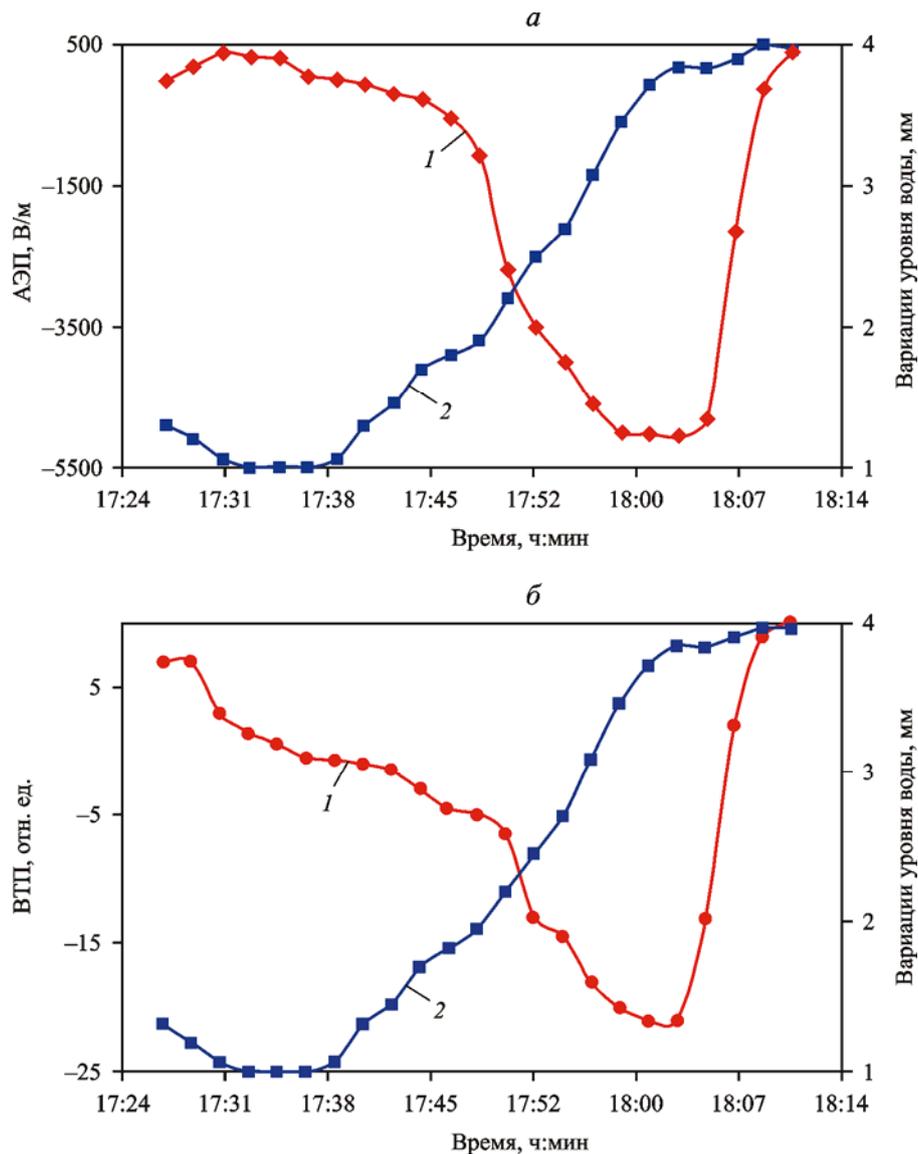
В мае 1987 г. на территории виброполигона «Узнож» (Белоруссия) наблюдался ряд геофизических параметров:

- АЭП, регистрируемое флюксометром «Поле-2», установленным на поверхности земли;
- вертикальный ток проводимости,  $j$ , (ВТП), регистрируемый с помощью дифференциальной пассивной антенны [Шулейкин и др., 2015];
- вариации уровня воды в наблюдательной скважине,  $z$ . Глубина водонапорного горизонта –  $\sim 125$  м, регистрация велась емкостным датчиком уровня с ценой деления 9 мВ/мм.

Запись сигналов с трех датчиков производилась на 3-канальный самописец РВЗ-3 от сейсмической станции ПРС.

На рис. 5 представлена оцифрованная с интервалом 2 мин запись АЭП, ВТП и уровня воды  $z$  в скважине 21.05.1987 г. с 17 ч 27 мин до 18 ч 11 мин. В это время над территорией полигона прошло кучево-дождевое облако, но осадков не было. Сложившаяся метеорологическая ситуация соответствовала условиям формирования термической грозы: дневной прогрев подстилающей поверхности стимулировал подъем (всплывание) перегретых масс воздуха в виде термических ячеек; проникновение теплого воздуха на большие высоты приводило к спаду атмосферного давления.

Обращает на себя внимание рост уровня воды в наблюдательной скважине, сопровождаемый спадом АЭП до величины несколько ниже  $-5$  кВ/м и синфазным с полем



**Рис. 5.** Вариации АЭП (а: кривая 1), ВТП (б: кривая 1) и уровня воды в наблюдательной скважине (2) при прохождении над территорией кучево-дождевого облака (виброполигон «Узнож», Белоруссия)

спадом ВТП – следствие отрицательного заряда нижней кромки кучево-дождевого облака. Коррелированные вариации поля и тока понятны:  $j = E(\lambda^+ + \lambda^-)$ , где  $\lambda^+$ ,  $\lambda^-$  – полярные проводимости воздуха.

К сожалению, регистрация вертикального тока проводимости велась в относительных единицах (см. рис. 5). Однако в ходе испытаний дифференциальной антенны в Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова и обсерватории «Борок» Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН была введена оценочная рабочая формула, которая с относительной ошибкой  $\sim 30\%$  позволяет оценить минимальный зарегистрированный ВТП величиной  $\sim (-10^{-9})$  А/м<sup>2</sup>.

До появления кучево-дождевого облака фоновый уровень АЭП составлял порядка 100 В/м; фоновый уровень ВТП положим равным среднемировому –  $(2-3) \cdot 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup> [Тверской, 1951; Кошкин, Ширкевич, 1976]. Это значит, что по грубым оценкам увеличение модуля тока при прохождении кучево-дождевого облака произошло в 50 раз

за счет поля и в 7–10 за счет увеличения полярных проводимостей. Зарегистрированный рост полярных проводимостей можно объяснить исключительно повышенной ионизацией за счет увеличения эксхалляции почвенного радона.

Для объяснения причин наблюдаемого явления обратимся к понятию барометрической эффективности [Барабанов и др., 1988; Багмет и др., 1989]. С увеличением атмосферного давления уровень грунтовых вод и дебит источников снижаются, а с уменьшением – повышаются. Барометрическая эффективность для различных водоносных пластов измеряется величинами 2–8 мм/мбар и рассматривается как параметр водоносного горизонта, характеризующий его упругие свойства и степень изоляции от атмосферы. Естественно, что максимальные изменения уровней, вызванные вариациями атмосферного давления, будут наблюдаться в верховодке и грунтовых водах, напрямую связанных с атмосферой; изменение уровней водонапорных горизонтов будет существенно меньше ввиду их изоляции от атмосферы.

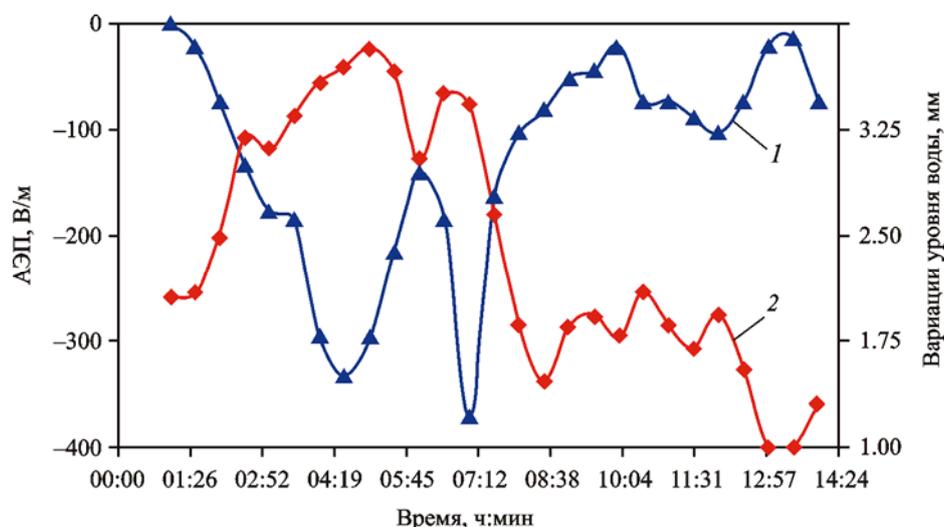
Поскольку вариация уровня воды регистрировалась в водонапорном горизонте, возьмем минимальное значение барометрической эффективности – 2 мм/мбар. Тогда подъем уровня воды на 3 мм будет вызван спадом атмосферного давления на 1.5 мбар. Здесь уместно добавить, что в суточном ходе атмосферного давления наблюдается два минимума: в 03–04 ч и в 15–16 ч. То есть падение давления, вызванное проходом кучево-дождевого облака, совпало еще и с временным интервалом минимума его суточной вариации.

Подъем уровня грунтовых вод «выдавливает» почвенный воздух из приповерхностных слоев грунта в атмосферу, т.е. способствует дополнительному эманированию радона в поровое пространство. Подтверждением причинной связи между рассматриваемыми параметрами и избыточной эксхалляцией радона являются оценка абсолютных величин тока  $-j \sim 10^{-9} \text{ А/м}^2$  [Шулейкин и др., 2015] и высокий коэффициент корреляции АЭП–ВТП  $-k(E; j) = 0.91$ .

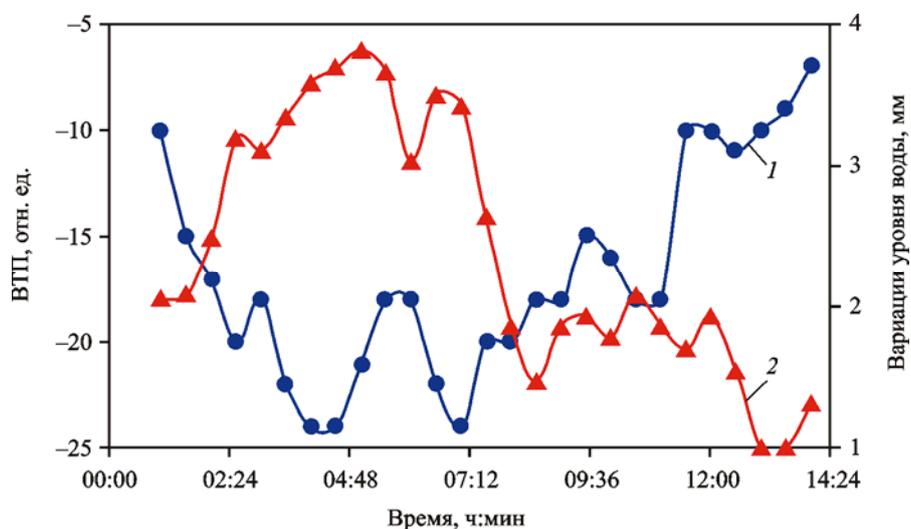
Рассмотрим еще одну запись изменений уровня воды в наблюдательной скважине при отрицательных АЭП. На рис. 6 приведен пример 12-часовых противофазных вариаций поля и уровня грунтовых вод, но при более слабых, чем в предыдущем эксперименте, отрицательных полях, зарегистрированных 29.05.1987 г.

Представленный отрезок записи вариаций АЭП и уровня воды в наблюдательной скважине был зарегистрирован в ночное время, в отсутствие оператора, когда самописец работал на малой скорости лентопротяжки, поэтому уверенную оцифровку удалось провести с интервалом 1 отсчет за 30 мин. Коэффициенты корреляции контролируемых параметров (АЭП и ВТП и уровня воды в наблюдательной скважине,  $z$ ) достаточно велики:  $k[E(t), z(t)] = -0.85$  и  $k[j(t), z(t)] = 0.79$  соответственно.

Необходимо подчеркнуть, что если в первом случае (см. рис. 5) изменение уровня воды и ВТП происходило только в сторону увеличения, то в случаях, представленных на рис. 6, 7, они разнонаправлены. И в первом, и во втором случае перепады ВТП имеют близкие отрицательные значения, хотя средние значения АЭП разнятся более чем на порядок. Столь большие значения ВТП 29.05.1987 г. объясняются исключительно метеорологическими условиями, в которых проводились наблюдения: между 00 ч 00 мин и 14 ч 24 мин 29.05.1987 г. небо было затянуто низкой облачностью, шел моросящий дождь, который прекратился только около 14 ч 00 мин. То есть зарегистрированные высокие отрицательные значения ВТП по сути были значениями тока дождевых капель, которые, по данным [Тверской, 1951], находятся в пределах  $10^{-9}$ – $10^{-8} \text{ А/м}^2$ . Необходимо подчеркнуть, что такие же оценки ВТП приведены на рис. 5.



**Рис. 6.** Вариации АЭП (1) и уровня воды в наблюдательной скважине (2) на территории виброполигона «Узнож» (Белоруссия) при слабых электрических полях 29.05.1987 г.



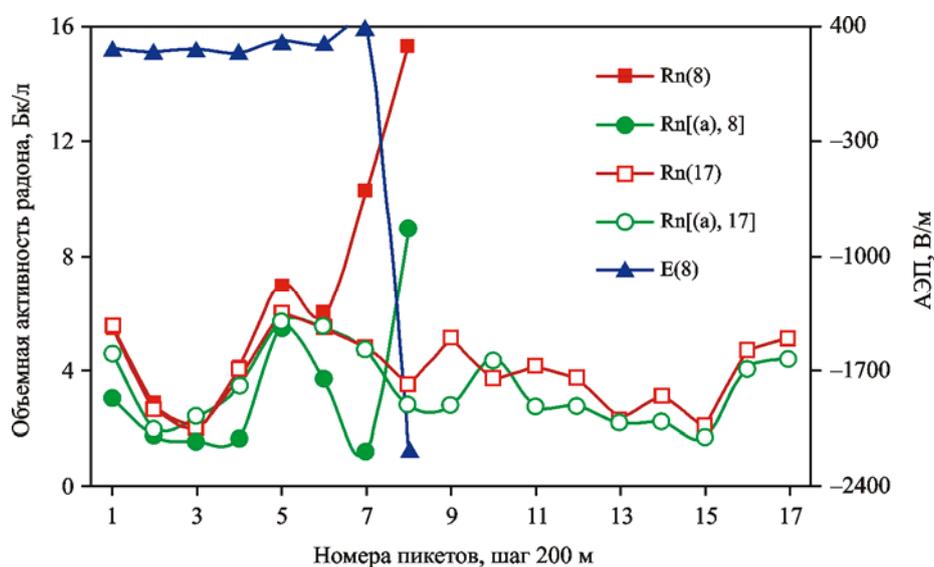
**Рис. 7.** Вариации ВТП (1) и уровня воды в наблюдательной скважине (2) на территории виброполигона «Узнож» (Белоруссия) 29.05.1987 г.

Вариации давления в период наблюдений имеют тот же порядок. Важно, что максимальные уровни зарегистрированы около 4–5 ч утра, во время первого минимума суточной вариации давления (см. выше). Зарегистрированные изменения уровня разнонаправлены и являются следствием разнонаправленных вариаций давления при морозящем дожде.

В непосредственной близости от места установки аппаратного комплекса находился прудик, урез воды которого –  $\sim 0.8$  м. Отсюда следует вывод, что изменения эксхалляции радона были вызваны в первую очередь вариациями уровня верховодки. Согласно результатам работы [Шулейкин и др., 2015], динамика верховодки, в свою очередь, управляет движением присутствующих в пласте пузырьковых образований газов – носителей ионизатора. При подъеме уровня верховодки воздухообмен почва–атмосфера будет интенсифицироваться; при спаде – замедляться.

### Изменение эксхалляции радона при вариациях атмосферного давления

К сожалению, при работах на полигоне «Узнож» контроль содержания радона в грунте и атмосфере не проводился. Полевые измерения вариаций объемной активности радона грунта и атмосферы в преддверье грозовой активности были проведены в июне 2003 г. на территории Касимовского подземного хранилища газа (ПХГ). В процессе проведения работ на одном из профилей наблюдались погодные условия, близкие метеорологической ситуации 21.05.1987 г. на полигоне «Узнож» (см. рис. 5). При выполнении измерений на пикете 6 на горизонте появилось кучево-дождевое облако; при завершении наблюдений на пикете 8 началась гроза; время работы на наблюдательном пикете и переезд заняли ~20 мин. Значения объемной активности радона грунта, радона атмосферы и АЭП представлены на рис. 8.



**Рис. 8.** Вариации объемной активности радона грунта и атмосферы и АЭП на территории Касимовского ПХГ (профиль 3.4 км) в предгрозовой период (Rn(8), Rn[(a), 8], E(8)) и в ясную погоду (Rn[(a), 17], Rn(17)) в июне 2003 г.

Обращает на себя внимание резкий рост объемной активности радона грунта на пикетах 7 и 8. При повторном проходе профиля в условиях «хорошей» погоды величина объемной активности радона атмосферы на пикете 8 составила величину  $Rn[(a), 17] = 2.78$  Бк/л, радона грунта –  $Rn(8; 17) = 3.5$  Бк/л (см. рис. 8). Таким образом, рост объемной активности радона атмосферы при падении давления, вызванного грозовым фронтом, составил ~3.2, рост объемной активности радона грунта – ~4.4.

Бросается в глаза запаздывание роста объемной активности атмосферы на пикете 7. Профильные измерения содержания радона в грунте и атмосфере проводились с использованием одного измерительного прибора – датчика РГА-01, а анализ образца воздуха занимал 5–6 мин. На наблюдательном пикете в первую очередь отбиралась проба атмосферного воздуха Rn[(a), 7]; это позволяет предположить, что на момент забора пробы рост эксхалляции почвенного радона еще не начался.

При работе на профиле по внешним признакам оценить уровень неводонапорных горизонтов в районе наблюдений установить не удалось. Профиль был заложен «в чистом поле». С целью уточнения связей исследуемых полей эксперимент повторялся на подушке насыпного песчаного грунта толщиной 0.6–0.8 м на заболоченной территории.

Для исключения ошибок, связанных с задержкой времени отбора проб, наблюдения выполнялись с использованием двух измерительных приборов типа РГА-01, прошедших предварительную проверку на идентичность. При появлении на горизонте кучево-дождевого облака с интервалом 20 мин были зафиксированы три последовательных отсчета объемной активности радона грунта, атмосферы и АЭП. Результаты измерений представлены в таблице. В течение 40 мин объемная активность радона грунта увеличилась в 17.3 раза, радона атмосферы – в 15.3 раза.

Объемная активность радона АЭП грунта и атмосферы  
за 43, 23 и 3 мин перед грозой

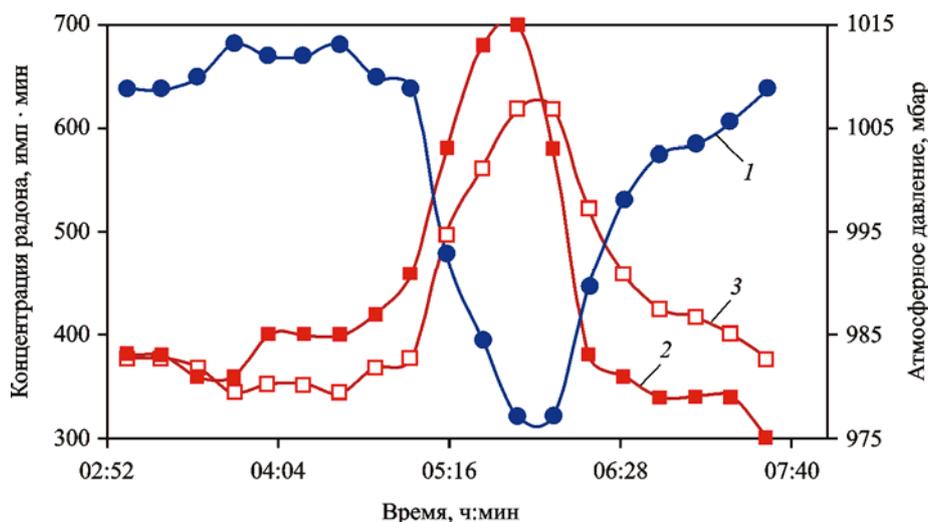
Время перед грозой, мин	АЭП, В/м	Rn (грунт), Бк/л	Rn (атмосфера), Бк/л
43	312	0.67	0.32
23	-1180	4.73	1.75
3	-7500	11.59	4.9
Рост объемной активности радона	–	17.3	15.3

Для прямого экспериментального подтверждения связей радона и атмосферного давления были использованы результаты измерений из работы [Фирстов и др., 2006]. Синхронные наблюдения атмосферного давления и содержания радона в грунте за 4 месяца 2002 г. и за период 24.02–03.03.2003 г. на Паратунском грабене (п-ов Камчатка) дали коэффициенты корреляции  $k_{2002}(Rn; P) = (-0.38)$  и  $k_{2003}(Rn; P) = (-0.41)$  соответственно.

На первый взгляд полученные коэффициенты корреляции малы. Но принимая во внимание, что на содержание радона в грунте влияет не только атмосферное давление, но и другие метеорологические и геофизические параметры – влажность, осадки, деформационные и сейсмические процессы, даже такие низкие абсолютные значения коэффициентов корреляции указывают на причинную связь атмосферного давления с содержанием радона в грунте. Для наглядной иллюстрации подобных связей рассмотрим корреляцию между этими параметрами в период 24–26.02.2003 г. Коэффициенты корреляции между атмосферным давлением и концентрацией радона в грунте за 24 февраля –  $k_{24}(Rn; P) = -0.69$ ; за 25 февраля –  $k_{25}(Rn; P) = -0.60$ ;  $k_{26}(Rn; P) = -0.24$ ;  $k_{24-26}(Rn; P) = -0.39$ . Другими словами, 24 и 25 февраля 2003 г. на Паратунском грабене основной причиной вариаций концентрации почвенного радона было атмосферное давление; 26 февраля доминировали прочие метеорологические и геофизические факторы, регулирующие поступление ионизатора в приповерхностные слои грунта.

Для более подробного рассмотрения связей изменений атмосферного давления и радона грунта рассмотрим еще одну запись из работы [Фирстов и др., 2006], когда радон отбирался в зоне полного влагонасыщения (рис. 9). Коэффициент корреляции между рассматриваемыми параметрами составлял  $k(Rn, P) = -0.78$ .

Помимо измеренных значений концентрации радона и атмосферного давления, на графике приведены расчетные значения радона как линейная аппроксимация вариаций давления:  $Rn = 8061 - 7.62 \cdot P$  [имп.·мин],  $D = 0.60$ ,  $P$  нормировано на 1 мбар. Из сравнения расчетных и измеренных значений видно, что до 04 ч (первые четыре точки на рис. 9) кривые практически совпадают. Затем идет расхождение расчетных и измеренных данных: до наступления минимума атмосферного давления абсолютные величины измеренных значений больше расчетных; после минимума давления больше становятся расчетные величины концентрации радона.



**Рис. 9.** Пример вариаций атмосферного давления (1) и концентрации радона в грунте (2) для случая отбора проб в зоне полного влагонасыщения (по [Фирстов и др., 2006])  
3 – зависимость  $Rn(P)$

### Заключение

Анализ результатов комплексных наблюдений элементов приземного атмосферного электричества при развитой динамике гидрогеологических процессов позволяет сделать следующие выводы.

Процесс инфильтрации осадков вниз по склону влечет за собой вымывание солей радия из глинистого водоупора; эксхалация почвенного радона повышается, что приводит к спаду АЭП – реверсивному электродному эффекту.

Промышленный отбор артезианских вод минимизируют воздухообмен почва–атмосфера; эксхалация почвенного радона падает, что неизбежно приводит к росту АЭП – ярко выраженному классическому электродному эффекту.

Обратная процедура – закачка флюида в грунт с образованием гидроразрыва – сопровождается рядом эффектов. С момента начала закачки начинается вытеснение газов из пор и трещин почв и пород на глубине гидроразрыва. В момент гидроразрыва происходит резкое сжатие порового пространства грунтов с мощным импульсным выбросом ионизатора в атмосферу; его ударное воздействие поднимает в воздух отрицательно заряженные пылевые образования, что проявляется в незначительном спаде поля. Мощный импульсный выброс радона сказывается на середине времени жизни тяжелых ионов в резком спаде АЭП до отрицательных значений. Дефицит ионизатора в приповерхностных слоях грунта, созданный гидроразрывом, снижает эксхалацию радона после завершения цикла закачки; АЭП принимает фоновые значения, превышающие уровень поля до начала активного воздействия. Фильтрация флюида из зоны гидроразрыва приводит к неизбежному росту эксхалации радона, к снижению АЭП; процесс длительный и заканчивается при релаксации давления в зоне гидроразрыва на фоновый уровень, присущий его величине до начала закачки.

Установлено связующее звено между вариациями атмосферного давления, изменениями эксхалации почвенного радона и элементами приземного атмосферного электричества. Это динамика верховодки и грунтовых вод, определяемая барометрической эффективностью. Рост атмосферного давления приводит к понижению уровня верховодки и грунтовых вод, спаду эксхалации радона, росту АЭП; обратный процесс сопровождается ростом уровней и эксхалации радона и проявляется в спаде поля.

## Литература

- Багмет А.Л., Багмет М.И., Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Киссин И.Г., Малугин В.А., Рукавишников Т.А., Савин И.В. Исследование земноприливных колебаний уровня подземных вод на скважине «Обнинск» // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. № 11. С. 84–95.
- Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Калачев А.А., Савин И.В. Частотная характеристика системы скважина – водоносный горизонт по данным наблюдений за уровнем подземных вод // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 3. С. 41–50.
- Баранов В.И. Радиометрия. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 343 с.
- Войтов Г.И., Рудаков В.П., Шулейкин В.Н., Козлова Н.С., Баранова Л.В. Эманационные и электрические эффекты в атмосфере подпочв над Калужской кольцевой структурой // Рос. журн. наук о Земле. 1999. Т. 1, № 6. С. 503–510.
- Гергедава Ш.К., Бузинов С.Н., Шулейкин В.Н., Рудаков В.П., Войтов Г.И. Нетрадиционная геофизика для подземных хранилищ газа // Нефть, газ и бизнес. 2001. № 5 (43). С. 2–7.
- Зубарев А.П., Шулейкин В.Н. Комплексный геофизический и геохимический контроль при эксплуатации подземных газохранилищ. М.: Изд-во ООО «Газпром ПХГ», 2009. 264 с.
- Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1976. 246 с.
- Купцов А.В., Маранулец Ю.В., Мищенко М.А., Руленко О.П., Шевцов Б.М., Щербина А.О. О связи высокочастотной акустической эмиссии с электрическим полем в приземном слое атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 71–76.
- Редин А.А. Математическое моделирование электродинамических процессов в приземном слое в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Таганрог, 2011. 19 с.
- Сисигина Т.И. Измерения эксхалиции радона с поверхности горных пород // Вопросы ядерной метеорологии. М.: Госатомиздат, 1962. С. 104–111.
- Сисигина Т.И. Эксхалиция радона с поверхности нескольких типов почв Европейской части СССР и Казахстана // Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии. М.: Атомиздат, 1965. С. 40–48.
- Тверской П.Н. Курс метеорологии Л.: Гидрометиздат, 1951. 887 с.
- Фирстов П.П., Чернева Н.В., Пономарев Е.А., Бузевич А.В. Подпочвенный радон и напряженность электрического поля атмосферы в районе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2006. № 1, вып. № 7. С. 102–109.
- Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. М.: Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 152 с.
- Шулейкин В.Н. Перенос радона в приповерхностные слои грунта и приземную атмосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2013а. Т. 12, № 2. С. 57–66.
- Шулейкин В.Н. Реверсивный электродный эффект: расчеты и эксперимент // Наука и технологические разработки. 2013б. № 2. С. 17–27.
- Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г. Исследование вариаций атмосферного электрического поля в районах нефтяных и газовых месторождений // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 21–29.
- Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г., Куповых Г.В. Развитие методов и средств прикладной геофизики: Атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. СПб.: Тип. ЦОП РГГМУ, 2015. 206 с.

*Сведения об авторе*

**ШУЛЕЙКИН Владимир Николаевич** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН. 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. Тел.: +7 (903) 511-91-36. E-mail: shvn1947@yandex.ru

**AQUIFER DYNAMICS AND ATMOSPHERIC ELECTRICITY****V.N. Shuleikin**

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** Measurements of variations in the atmospheric electric field, soil and atmospheric radon concentration and hydrogeological parameters made it possible to establish links between the listed processes. The rise in aquifer levels increases the outflow of soil radon, which causes a fall in the atmospheric electric field; the fall in levels leads to the opposite effects. The cause of the rise may be infiltration of precipitation, hydraulic fracturing, lowering of atmospheric pressure; the cause of the fall may be a pumping of artesian waters or an increase in atmospheric pressure.

*Keywords:* atmospheric pressure, atmospheric electric field, radon, levels of aquifers.