

УДК 551.594

ВОЗМУЩЕНИЕ ИОНОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ПОВЫШЕНИИ ЭМАНАЦИИ РАДОНА

© 2024 г. В. В. Денисенко^{1*}, Е. В. Розанов², К. В. Белюченко³,
Ф. С. Бессараб³, К. С. Голубенко⁴, М. В. Клименко³

¹Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук,
Красноярск, Академгородок, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Калининградский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

⁴Оулуский университет, Оулу, Финляндия

*E-mail: denisen@icm.krasn.ru

Поступила в редакцию 19.07.2023

После доработки 15.11.2023

Принята к публикации 20.11.2023

За счет повышения эманации радона увеличивается проводимость в приземном слое воздуха, что вызывает изменение электрического поля в нижней части атмосферы и, согласно некоторым гипотезам, в ионосфере. Известны предложения о возможности использовать такие ионосферные возмущения в качестве предвестников землетрясений. В представленной работе ионосферные электрические поля рассчитаны в рамках квазистационарной модели атмосферного проводника, включающего ионосферу. Также рассмотрены следствия кажущейся парадоксальной точки зрения об уменьшении проводимости приземного воздуха при повышении содержания радона. Показано, что даже при экстремальной эманации радона рассчитанные возмущения ионосферного электрического поля получаются на три-четыре порядка меньшими, чем предполагаемые предвестники землетрясений.

Ключевые слова: атмосфера, ионосфера, эманация радона, проводимость, электрическое поле, математическое моделирование.

DOI: 10.31857/S0207401X24060086

ВВЕДЕНИЕ

Изучению литосферно-атмосферно-ионосферных связей посвящено множество исследований. Влияние различных тропосферных возмущений на ионосферу рассмотрено в работе [1]. В монографии [2] дан детальный обзор современного состояния исследований и утверждается, что вследствие эманации радона происходят значительные колебания проводимости в приземном слое атмосферы, которые приводят к изменениям ионосферного потенциала над районами, где ожидаются землетрясения, и что это основной источник ионосферных аномалий над сейсмически активными районами. Согласно данным работ [3, 4] для формирования наблюдаемых ионосферных аномалий перед землетрясениями требуется амплитуда сейсмогенного электрического поля в ионосфере от 1 до 10 мВ/м. За счет дрейфа

плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях, дополнительное электрическое поле с такой напряженностью приводит к значительным перераспределениям электронов и ионов и образованию ионосферных неоднородностей.

Согласно общепринятой терминологии ионосфера является верхней частью атмосферы. В нашей модели использованы различные приближения при описании этих частей, и поэтому для краткости будем называть атмосферой только ее часть, лежащую ниже ионосферы (ниже 60 км).

В настоящей работе количественно проанализированы изменения электрического поля в атмосфере и ионосфере за счет повышения эманации радона, приводящего к увеличению проводимости в приземном слое воздуха. Мы также проанализировали кажущуюся парадоксальной точку зрения об уменьшении проводимости при-

земного воздуха при повышении содержания радона, рассмотренную в работе [2]. В известных нам публикациях других авторов говорится только об увеличении проводимости за счет радиоактивности радона. Так, в статье [5] показано монотонное увеличение проводимости воздуха на порядок при стократном возрастании скорости возникновения ионов под действием радиации радона. В той же статье [5] продемонстрировано уменьшение проводимости на порядок из-за присутствия пыли в воздухе. Поэтому наш анализ ионосферного проявления уменьшения проводимости в приземном слое воздуха может быть применен если не для радона, то для пыли.

Наряду с эманацией радона приземные области с бесконечной проводимостью могут приближенно описывать возвышенности, поскольку проводимости обычной почвы и даже таких минералов, как мрамор, на много порядков превосходят проводимость воздуха. Роль крупномасштабного рельефа рассмотрена в статье [6], а изменения пространственных распределений электрического поля над горами с крутыми склонами показаны в работе [7]. В последнем случае результаты настоящей работы могут быть использованы для оценки возмущений электрического поля в ионосфере над горами.

Для получения верхней оценки возможных явлений мы абсолютизируем эти изменения, как увеличение проводимости до бесконечности или ее уменьшение до нуля. Решив задачи электропроводности в атмосфере с измененными таким образом проводимостями, мы получаем изменение электрического тока, уходящего из атмосферы в ионосферу. Чтобы эти токи растеклись по ионосфере, прежде чем вернуться через атмосферу на Землю, необходимо наличие электрического поля в ионосфере, величину которого можно определить, используя модель электропроводности ионосферы.

Представленные в настоящей статье результаты расчетов призваны показать, может ли эманация радона обеспечить настолько значительные изменения проводимости воздуха, чтобы соответствующие вариации ионосферного электрического поля могли регистрироваться на спутниках и приводить к формированию ионосферных аномалий в электронной концентрации в периоды накануне землетрясений.

УРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Пространственное распределение электрического поля и тока в атмосфере и ионосфере Земли мы находим, решая уравнение электропроводности [8], сформулированное в квазистационарном приближении:

$$-\operatorname{div}(\hat{\sigma} \operatorname{grad} V) = 0, \quad (1)$$

где V — электрический потенциал, через который выражается напряженность электрического поля $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} V$ и плотность тока $\mathbf{j} = \hat{\sigma} \mathbf{E}$. Тензор проводимости воздуха $\hat{\sigma}$ в ионосфере является гиротропным тензором с компонентами, которые называются проводимостями Педерсена σ_p , Холла σ_H и продольной $\sigma_{||}$. В атмосфере до высоты 50 км он становится скаляром $\sigma(z)$. Построенная в работе [6] и используемая здесь функция $\log_{10}(\sigma(z))$ определена следующими формулами:

$$s_{30} + (z - 30)(s_{50} - s_{30})/20, \quad \text{при } 30 < z < 50,$$

$$-13 + z(s_{30} + 13)/30, \quad \text{при } 6.5 < z < 30,$$

$$-13 + z(s_{30} + 13)/30 - (z/6.5 - 1)^2(s_0 - 13), \\ \text{при } z < 6.5,$$

Значения функции $\log_{10}(\sigma(z))$ на высотах $z = 50, 30, 0$ км равны: $s_{50} = -10$, $s_{30} = -10.9$, $s_0 = 13.812$ над землей, и $s_0 = 13.51$ над морем¹.

В принципе, для расчета атмосферной проводимости могут быть использованы данные о высотных распределениях ионов [9, 10]. На высотах более 90 км (Е- и F-слои ионосферы) наша модель проводимости [6] построена на основе эмпирических моделей IRI-2016, MSISE-90, IGRF-12. Из нее здесь мы используем только типичное для ночного времени суток значение интегральной проводимости Педерсена $\Sigma_p = 0.2$ См. В интервале высот $50 < z < 90$ км (D-слой ионосферы) атмосферное и ионосферное распределения проводимостей объединены с использованием гладкой интерполяции. Наши расчеты показали, что упрощение тензора проводимости до скалярной величины вплоть до высоты 60 км (вместо 50 км) уменьшает величину интересующего нас ионо-

¹ К сожалению, в работе [6] знак параметра s_0 был неверный (этот параметр должен быть положительным), необходимое исправление сделано здесь. Такая же поправка в знаке параметра s_0 к работе [6] дана в работе Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G. // Surv. Geophys. 2019. V. 40. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9505-z>

сферного электрического поля примерно на 2.5% в последней из рассмотренных ниже задач, которая является более чувствительной к такому изменению. Эта точность приемлема для наших целей.

Следует отметить, что D-слой менее изучен, чем лежащие выше и ниже него области, поскольку, во-первых, в нем не работают многие из используемых выше или ниже методы измерений, и, во-вторых, его параметры варьируются на два-три порядка [11]. Конкретное распределение проводимости в D-слое оказывается несущественным для решаемой задачи. Важно только то, что она велика по сравнению с проводимостью на высоте менее 60 км, чтобы незначительно увеличивать сопротивление столба воздуха от земли до ионосферы, и мала по сравнению с проводимостью Педерсена в E- и F-слоях ионосферы, чтобы незначительно увеличивать интегральные проводимости ионосферы. Примеры расчетов с детальным учетом тензорной проводимости в D-слое и анализом роли наклона магнитного поля приведены в статье [12].

Поскольку здесь рассматриваются локальные явления, пренебрегаем кривизной поверхности Земли и используем цилиндрические координаты z, r, φ с направленной вверх осью z . Поверхность Земли считаем эквипотенциальной, так как проводимости почвы и многих минералов на много порядков больше, чем проводимость воздуха. Соответствующее граничное условие имеет вид

$$V|_{z=0} = -V_0, \quad (2)$$

значение V_0 будет определено ниже.

Зададим осесимметричное изменение проводимости воздуха около земли за счет эманации радона. Также не будем учитывать отклонение геомагнитного поля от вертикали, хотя позже обсудим его роль. Поэтому задача осесимметрична. Все члены уравнения (1), содержащие зависящую только от высоты проводимость Холла, взаимно сокращаются, и уравнение электропроводности (1) принимает вид

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_{\parallel} \frac{\partial V}{\partial z} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \sigma_{\perp} \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0. \quad (3)$$

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА

Рассмотрим условия в ночное время суток, поскольку нас интересует максимальное возмож-

ное изменение ионосферного электрического поля. Днем ионосферная проводимость на два порядка возрастает, и, следовательно, убывает напряженность электрического поля, так как токи, проникающие из атмосферы в ионосферу, не изменяются. Ночью радон не поднимается на высоту более примерно 300 м от поверхности Земли [13].

Обусловленная распадом радона радиация увеличивает ионизацию воздуха и повышает проводимость, возможно, на порядок [5, 14]. Мы ставим целью не анализ эффекта при различных проводимостях, а нахождение максимально возможного результата. Поэтому будем считать, что проводимость в содержащем радон воздухе увеличилась до бесконечности. Это предельное увеличение эквивалентно подъему уровня постановки граничного условия (2) на верхнюю границу слоя:

$$V|_{z=z_g(r)} = -V_0, \quad (4)$$

где функция $z_g(r)$ определяет форму этой границы. Чтобы не иметь разрывов, используем гладкую функцию $z_g(r)$ (в метрах) как

$$z_g(r) = \begin{cases} 300, & \text{при } r < r_1 \\ 150[1 - \sin\{\pi(r-r_0)/(r_2-r_1)\}], & r_1 < r < r_2 \\ 0, & \text{при } r > r_2 \end{cases},$$

где $r_0 = (r_2 + r_1)/2$ — радиус круга, который считаем характерным размером области, а $r_{1,2}$ служат для сглаживания. Построенная функция $z_g(r)$ и ее первая производная непрерывны. В приведенных ниже расчетах: $r_0 = 100$ км, $r_{1,2} = r_0 \pm 25$ км.

Для решения уравнения (1) в проводнике, состоящем из атмосферы и ионосферы, применим метод декомпозиции области. Для этого зададим условную границу между атмосферой и ионосферой на высоте z_i . В ионосфере задача существенно упрощается за счет высокой продольной проводимости $\sigma_{\parallel}$, которую приближенно можно считать бесконечной. Это делает магнитные силовые линии эквипотенциальными, а уравнение (3) — одномерным:

$$-\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \Sigma_p \frac{dV(r)}{dr} \right) = j_z(z_i, r), \quad (5)$$

где правая часть — плотность тока, втекающего из атмосферы в ионосферу, Σ_p — интегральная педерсеновская проводимость ионосферы, которую из-за малого горизонтального масштаба решаемых

здесь задач будем считать константой. Решение этого уравнения сводится к интегрированию:

$$E_r(r) = -\frac{dV(r)}{dr} = -\frac{1}{r\sum_p} \int_0^r j_z(z_i, r') r' dr', \quad (6)$$

где r' — переменная интегрирования. Тем самым выражение (6) позволяет рассчитать радиальную компоненту ионосферного электрического поля, а азимутальная компонента равна нулю в силу осевой симметрии. Подробно методы решения задачи электропроводности и использованные упрощения в более общем случае описаны в наших работах [6, 15].

В методе декомпозиции области, используемом нами для решения задачи в едином проводнике, состоящем из атмосферы и ионосферы, предполагаются итерации: ниже высоты z_i решается атмосферная задача с заданным потенциалом на этой границе, затем полученная на высоте z_i плотность тока используется как заданная правая часть в уравнении (5) для поля в ионосфере. После его решения новое распределение потенциала используется в верхнем граничном условии в атмосферной задаче, и так далее по циклу.

Более сложные тестовые расчеты, в которых был учтен тензорный характер проводимости на всех высотах, показали, что высоту z_i можно принять равной 60 км при незначительных возмущениях токов, проникающих из атмосферы в ионосферу, которые нас и интересуют. Возмущения атмосферных электрических полей и токов на высоте менее 30 км также малы. Даже подъем z_i до 90 км ведет к изменениям решений, которые не видны в масштабе приведенных ниже рисунков.

Соответствующее хорошо проводящей ионосфере граничное условие для атмосферы в первом приближении имеет вид

$$V|_{z=z_i} = 0. \quad (7)$$

Решение эллиптической краевой задачи (3), (4), (7) с дополнительным условием убывания его на бесконечности существует и является единственным. Численный метод решения приведен нами в статье [16].

В качестве невозмущенного состояния атмосферы мы рассматриваем глобальную электрическую цепь (ГЭЦ) в так называемой области хорошей погоды [17]. Входным параметром ГЭЦ может быть плотность тока в области хорошей погоды,

ее характерная величина $j_0 = 2 \text{ пА/м}^2$. В используемой модели проводимость столба атмосферы от земли на уровне моря до ионосферы составляет $0.8 \cdot 10^{-17} \text{ См/м}^2$. Эти два параметра дают напряжение Земля–ионосфера V_0 около 250 кВ, что тоже является типичным значением для ГЭЦ [17]. Поскольку проводимость воздуха у поверхности земли $\sigma(0) = 1.54 \cdot 10^{-14} \text{ См/м}$, напряженность электрического поля в области хорошей погоды равна 130 В/м. Собственно, для удовлетворения этих условий используемая здесь модель проводимости [6] и скомпонована из известных эмпирических моделей.

В результате численного решения краевой задачи (3), (4), (7) со скалярной проводимостью $\sigma_p = \sigma_{||} = \sigma(z)$ получены пространственные распределения потенциала, напряженности электрического поля и плотности тока в атмосфере. После этого по формуле (6) найдена величина ионосферного электрического поля.

Расчеты всех рассмотренных ниже случаев в ионосфере дают изменения потенциала на пять порядков меньше, чем напряжение Земля–ионосфера. Естественно, их подстановка вместо нуля в верхнее граничное условие атмосферной задачи (7) практически не изменяет величин поля и токов в атмосфере. Поэтому фактически итерации в методе декомпозиции области не требуются.

На рис. 1 приведены кривые, показывающие вызванные эманацией радона возмущения плотности тока, уходящего из атмосферы в ионосферу, и ионосферного поля, которые определены как разности полученных значений и тех, что были в ионосфере без дополнительного выхода радона из-под земли. При дальнейшем увеличении координаты g напряженность электрического поля стремится к нулю примерно как $1/r$.

Напомним, что для получения верхней оценки явления мы увеличили проводимость в занятом радоном приземном слое воздуха до бесконечности. В работе [18] эта задача решена в более общей постановке.

Увеличение проводимости воздуха в приземном слое за счет эманации радона рассчитано с помощью комбинированной химико-климатической модели SOCOL, версия 2.0 [19], доработанной для описания эмиссии, переноса и распада ^{222}Ra [14]. Также учтено магнитное наклонение, что лишает решение осевой симметрии. Откло-

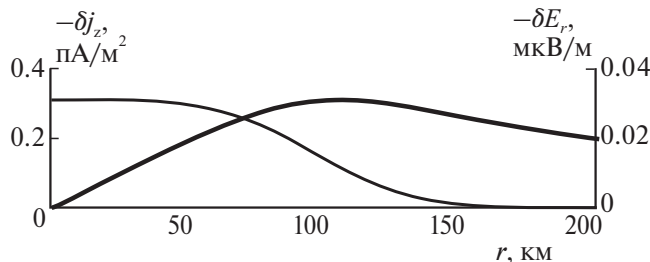


Рис. 1. Возмущения плотности тока, втекающего из атмосферы в ионосферу, $\delta j_z(r)$, (тонкая кривая) и радиальной компоненты ионосферного электрического поля $\delta E_r(r)$ (жирная кривая) при увеличении проводимости в занятом радоном приземном слое воздуха.

нение магнитного поля от вертикали всегда уменьшает ионосферное электрическое поле в рассматриваемых процессах с определенными токами, переносимыми из атмосферы в ионосферу, поскольку при этом возрастает интегральная проводимость ионосферы. Магнитное наклонение в 50° (отсчитывается от горизонтали), такое как в Японии, уменьшает ионосферное поле в модели, предложенной в работе [18], примерно на 20%. Там же получены результаты расчета возмущения ионосферного электрического поля, не превышающие величину 0.05 мкВ/м, с источником радона вдвое большего радиуса, по сравнению с рассматриваемым здесь, что согласуется с результатами, представленными на рис. 1.

УМЕНЬШЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА

В монографии [2] рассмотрена кажущаяся парадоксальной точка зрения об уменьшении проводимости приземного воздуха при повышении содержания радона. Проанализируем возникающие в рамках этой гипотезы изменения ионосферного электрического поля. Отметим, что уменьшение проводимости возможно и по другим причинам, например из-за пыли [5].

Пусть для простоты оценки максимума возможного эффекта, проводимость в тонком приземном слое воздуха упадет до нуля. Полагая слой достаточно тонким, его можно описать, если заменить соответствующее идеальной проводимости земли граничное условие (2) на условие непротекания тока из атмосферы в землю:

$$j_z|_{z=0, r < r_0} = 0$$

в той части земной поверхности, где происходит эманация радона. Пусть это будет круг радиусом

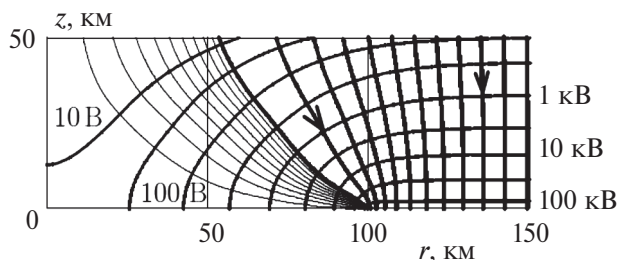


Рис. 2. Решение задачи электропроводности при уменьшенной до нуля проводимости в приземном слое воздуха в круге радиусом 100 км. Эквипотенциалы — кривые средней толщины с указанными значениями потенциала на них. Линии тока с интервалом между ними, составляющим $7 \text{ км} \times 2 \text{ пА/м}^2$, — жирные кривые со стрелками, указывающими направление тока, и дополнительно построенные с интервалом в десять раз меньшим — тонкие кривые.

$r_0 = 100 \text{ км}$. Нас интересует возмущение электрического поля вследствие повышения эманации радона в рассматриваемом круге. Предположим, что это локальное повышение на фоне однородной по горизонтали эманации. Роль последней уже отражена в распределении фоновой атмосферной проводимости: проводимость во всем приземном слое воздуха формируется в значительной мере за счет радона и пыли, тогда как на высоте $>1 \text{ км}$ доминирующей становится роль космических лучей [13]. Вне выделенного круга условия не изменились, т.е. осталось граничное условие вида (4) на горизонтальной поверхности $z=0$. Теперь полный набор граничных условий принимает вид

$$V|_{z=z_i} = 0, \quad j_z|_{z=0, r < r_0} = 0, \quad V|_{z=0, r > r_0} = -V_0. \quad (8)$$

На рис. 2 показаны результаты численного решения задачи (3), (8).

Поскольку в рассматриваемой области значения потенциала изменяются на много порядков, эквипотенциалы построены с постоянным шагом в логарифмическом масштабе, а значения потенциала приведены около каждой второй эквипотенциали. Линии тока показаны жирными кривыми. Их начальные точки на высоте 60 км выбраны так, чтобы были одинаковыми токи, протекающие между соседними линиями, т.е. чтобы выполнялось условие

$$\int j_z dr = \text{const.}$$

В плоских двумерных задачах эти токи сохраняются с продвижением вдоль линий тока. В рас-

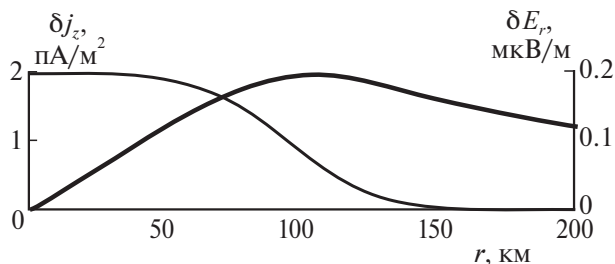


Рис. 3. Возмущения плотности тока, втекающего из атмосферы в ионосферу, $\delta j_z(r)$ (тонкая кривая) и радиальной компоненты ионосферного электрического поля $\delta E_r(r)$ (жирная кривая) при уменьшении проводимости в приземном слое воздуха.

смаатриваемом трехмерном случае этого свойства, вообще говоря, нет, но оно приближенно выполняется с удалением от области эманации радона, как это видно из рис. 2. Там линии тока становятся вертикальными прямыми, а эквипотенциали — горизонтальными плоскостями, как и должно быть в горизонтально однородной атмосфере. Отметим, что для задачи с увеличенной в приземном слое проводимостью аналогичный рисунок почти неотличим от картины невозмущенной области, и поэтому не был приведен.

На рис. 3 тонкой кривой показано возмущение плотности тока на высоте нижней границы ионосферы z_i как разность между плотностями тока, представленного на рис. 2, и однородным вертикальным током j_0 , который существовал в отсутствие эманации радона. Это возмущение тока на верхней границе атмосферы можно с приемлемой точностью считать неизменным и выше, вплоть до ионосферы. Оно является источником тока в ионосфере, т.е. ему соответствует правая часть в уравнении электропроводности ионосферы (5).

Из рис. 3 видно, что возмущение напряженности ионосферного электрического поля $\delta E_r(r)$ достигает максимума на окружности радиуса около 100 км, и при $r > 200$ км стремится к нулю примерно как $1/r$. Простые оценки получаются, если приближенно представить токи, показанные на рис. 2, как однородный ток $j_0 = 2$ пА/м², протекающий внутри цилиндра радиуса r_0 при отсутствии токов вне этого цилиндра.

Тогда дающая решение уравнения электропроводности ионосферы (5) формула (6) принимает вид

$$2\pi r \Sigma_p E_r(r) = \begin{cases} \pi r^2 j_0, & \text{при } r < r_0 \\ \pi r_0^2 j_0, & \text{при } r > r_0 \end{cases} \quad (9)$$

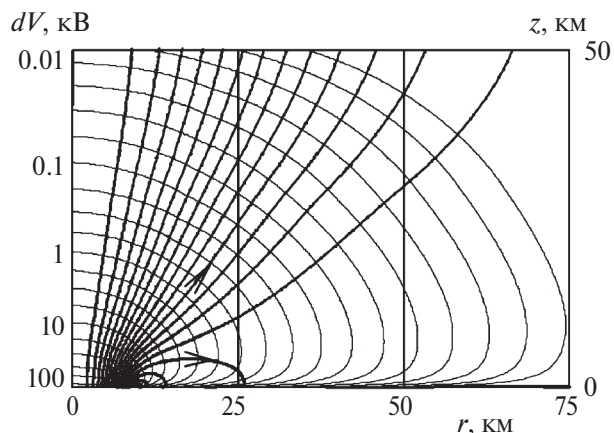


Рис. 4. Отличие решения задачи электропроводности для потенциала V при уменьшенной до нуля проводимости в приземном слое воздуха в круге радиусом 10 км от потенциала в области невозмущенной ГЭЦ. Эквипотенциали — тонкие кривые с указанными значениями потенциала на них, шаг — 0.25 логарифма значения потенциала. Сечения трубок тока с интервалом, равным $\pi \cdot 10^{-5}$ А, — жирные кривые со стрелками, указывающими направление тока.

Азимутальная компонента ионосферного электрического поля равна нулю в силу симметрии, а вертикальная — в силу высокой продольной проводимости $\sigma_{||}$, которая в модели полагается бесконечной. Максимум радиальной компоненты E_r в ионосфере достигается при $r = r_0$:

$$E_{r,\max} = \frac{r_0 j_0}{2\Sigma_p}. \quad (10)$$

Эта оценка говорит, во-первых, что поле на два порядка больше в ночное время, когда интегральная педерсеновская проводимость ионосферы убывает до величины $\Sigma_p = 0.2$ См, и, во-вторых, что максимальное поле приблизительно пропорционально радиусу области эманации радона. Если принять $r_0 = 100$ км, то максимальная величина поля составляет 0.5 мкВ/м. На рис. 3 жирной кривой показано возмущение ионосферного электрического поля, полученное без упрощений (9) и (10). Его напряженность не превосходит 0.2 мкВ/м, т.е. грубая оценка (10) не слишком завышена.

На рис. 4 представлено решение задачи электропроводности при уменьшенной до нуля проводимости в приземном слое воздуха в меньшем круге радиусом $r_0 = 10$ км. В отличие от рис. 2, на этом рисунке представлено не само решение для потенциала V , а δV — его отличие от потенциала в невозмущенных областях ГЭЦ. Поскольку в таких областях плотность вертикального тока составляет j_0 , второе и третье из граничных

условий (8) для такой разности решений означает заданную плотность тока $j_z = -j_0$ в круге при $z = 0$, $r < r_0$, и $V = 0$ на оставшейся части плоскости при $z = 0$. Другими словами, это задача о растекании тока силой $2\pi \cdot 10^{-4}$ А из круга при $z = 0$, $r < r_0$. Также в отличие от рис. 2, на рис. 4 показаны сечения двадцати трубок тока, в которых ток равен $\pi \cdot 10^{-5}$, $2\pi \cdot 10^{-5}$, ..., $20\pi \cdot 10^{-5}$ А. Как видно из рис. 4, около половины тока уходит в ионосферный круг радиусом около $r = 40$ км. При больших значениях r_0 радиус r круга втекания тока в ионосферу становится примерно равным радиусу r_0 , как видно из рис. 1 и 2. Можно сказать, что при малых значениях r_0 радиус r области этого дополнительного тока равен r_0 только около земли, а с подъемом к ионосфере радиус r области, занятой этим током, увеличивается примерно до 40 км. Поэтому в выражение (10) войдет дополнительный уменьшающий множитель, равный $r_0/40$. Отметим, что в этой задаче максимум ионосферного электрического поля, равный 3.2 В/м, достигается при $r = 40$ км. При вдвое большем радиусе приземного изолятора ($r_0 = 20$ км) ионосферный круг с максимальной напряженностью электрического поля расширяется незначительно, до 41 км, а величина самого поля возрастает до 14 В/м, т.е. примерно в четыре раза, соответственно возрастанию тока силой $\pi r_0^2 j_0$, исключенного этим изолятором из ГЭЦ.

Как видим, возмущение напряженности ионосферного электрического поля не превосходит 0.2 мкВ/м, если справедлива гипотеза о существенном уменьшении проводимости воздуха за счет радона. Конкретное значение может в несколько раз возрасти при увеличении области эманации радона и в несколько раз уменьшиться, если рассмотреть реальную, а не полную ионизацию в приземном слое воздуха. Такие значения ионосферного поля на порядок больше, чем при рассмотренном выше традиционном представлении об увеличении проводимости воздуха, но все же на три-четыре порядка меньше, чем поля, обычно существующие в ионосфере, и те поля, которые некоторые исследователи считают необходимыми для формирования ионосферных предвестников землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мы не видим возможности объяснить изменения ионосферного электриче-

ского поля на несколько мВ/м, трактуемые как один из основных механизмов формирования ионосферных предвестников землетрясений, изменением атмосферной проводимости воздуха за счет выбросов радона. Даже при экстремальной эманации радона возмущения ионосферного электрического поля за счет увеличения или уменьшения атмосферной проводимости в приземном слое получаются на три-четыре порядка меньшими, чем необходимо для формирования ионосферных возмущений электронной концентрации, наблюдаемых накануне сильных землетрясений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубков Г.В., Адамсон С.О. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 5. С. 531; <https://doi.org/10.31857/S0207401X22050053>
2. Pulinets S., Ouzounov D., Karelin A., Boyarchuk K. Earthquake Precursors in the Atmosphere and Ionosphere. New Concepts. Dordrecht: Springer Nature, 2022.
3. Xu T., Hu Y., Wu J. et al. // Adv. Space Res. 2011. V. 47. № 6. P. 1001; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.11.006>
4. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E. et al. // Adv. Space Res. 2011. V. 48. № 3. P. 488; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.03.040>
5. Harrison R.G., Aplin K.L., Rycroft M.J. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2010. V. 72. № 5–6. P. 376; <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.12.004>
6. Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G. // Surv. Geophys. 2019. V. 40. № 1. P. 1; <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9499-6>
7. Денисенко В.В. // Матер. Шестой Всеросс. конф. "Глобальная электрическая цепь". Ярославль: Филигрань, 2023. С. 48.
8. Molchanov O., Hayakawa M. Seismo-electromagnetics and related phenomena: history and latest results. Tokyo: TERRAPUB, 2008.
9. Чэнсюнь Ю., Чжицзянь Л. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 10. С. 28; <https://doi.org/10.31857/S0207401X22100041>
10. Ларин И.К. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 5. С. 371; <https://doi.org/10.31857/S0207401X22050089>
11. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
12. Nesterov S., Denisenko V., Boudjada M.Y., Lammer H. // Proc. 5th Int. Conf. Trigger Effects in Geosystems. Springer, Cham: 2019. P. 559; https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_59

13. The Earth's Electrical Environment. Washington, DC: The National Academies Press, 1986;
<https://doi.org/10.17226/898>
14. Golubenko K., Rozanov E., Mironova I., Karagodin A., Usoskin I. // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. № 12. e2020GL088619;
<https://doi.org/10.1029/2020GL088619>
15. Клименко В.В., Денисенко В.В., Клименко М.В. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 10. С. 84;
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22100077>
16. Денисенко В.В., Помозов Е.В. // Вычислит. технологии. 2010. Т. 15. № 5. С. 34.
17. Мареєв Е.А. // УФН. 2010. Т. 180. № 5. С. 527;
<https://doi.org/10.3367/UFNe.0180.201005h.0527>
18. Denisenko V.V., Rozanov E.V., Belyuchenko K.V. et al. // Proc. VIII Int. Conf. "Atmosphere, Ionosphere, Safety (AIS-2023)". Kaliningrad, 2023. P. 117.
19. Schraner M., Rozanov E., Schnadt Poberaj C. et al. // Atmosph. Chem. Phys. 2008. V. 8. № 19. P. 5957;
<https://doi.org/10.5194/acp-8-5957-2008>

THE IONOSPHERIC ELECTRIC FIELD PERTURBATION WITH AN INCREASE IN RADON EMANATION

**V. V. Denisenko¹, E. V. Rozanov², K. V. Belyuchenko³,
F. S. Bessarab³, K. S. Golubenko⁴, M. V. Klimenko³**

¹*Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

²*Sankt-Petersburg State University, St Petersburg, Russia*

³*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave
Propagation RAS, Kaliningrad, Russia*

⁴*Oulu University, Oulu, Finland*

*E-mail: denisen@icm.krasn.ru

Due to the increase in radon emanation, the conductivity in the surface layer of air increases, which causes variations in the electric fields in the low atmosphere and according to some hypotheses in the ionosphere. There are known proposals on the possibility of using such ionospheric disturbances as precursors of earthquakes. We simulate the ionospheric electric fields in the framework of a quasi-stationary model of the conductor consisting of the atmosphere including the ionosphere. The consequences of the paradoxical point of view about a decrease in the conductivity of surface air with an increase in radon content are also considered. Even with extreme radon emanation, disturbances of the ionospheric electric field are obtained three to four orders of magnitude smaller than the supposed precursors of earthquakes.

Keywords: atmosphere, ionosphere, radon emanations, conductivity, electric field, mathematical simulation.

REFERENCES

1. Golubkov G.V., Adamson S.O. et al. // *Rus. J. Phys. Chem. B* 2022. V. 16. № 3. P. 508.
<https://doi.org/10.1134/S1990793122030058>
2. Pulnits S., Ouzounov D., Karelin A., Boyarchuk K. *Earthquake Precursors in the Atmosphere and Ionosphere*. New Concepts. Dordrecht: Springer Nature, 2022.
3. Xu T., Hu Y., Wu J. et al. // *Adv. Space Res.* 2011. V. 47. № 6. P. 1001;
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.11.006>
4. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E. et al. // *Adv. Space Res.* 2011. V. 48. № 3. P. 488;
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.03.040>
5. Harrison R.G., Aplin K.L., Rycroft M.J. // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2010. V. 72. № 5–6. P. 376;
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.12.004>
6. Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G. // *Surv. Geophys.* 2019. V. 40. № 1. P. 1;
<https://doi.org/10.1007/s10712-018-9499-6>
7. Denisenko V.V. *Proc. VI Russ. Conf. Glob. Electr. Circ., Yaroslavl*, 2023. P. 48.
8. Molchanov O., Hayakawa M. *Seismo-electromagnetics and related phenomena: history and latest results*. Tokyo: TERRAPUB, 2008.
9. Chengxun Y., Zhijian L. et al. // *Rus. J. Phys. Chem. B* 2022. V. 16. № 5. P. 955.
<https://doi.org/10.1134/S1990793122050189>
10. Larin I.K. // *Rus. J. Phys. Chem. B* 2022. V. 16. № 3. P. 492.
<https://doi.org/10.1134/S1990793122030083>
11. Brunelli B.E., Namgaladze A.A. *Physics of the ionosphere*. M.: Nauka, 1988.
12. Nesterov S., Denisenko V., Boudjada M.Y., Lammer H. // *Proc. 5th Int. Conf. Trigger Effects in Geosystems*. Springer, Cham: 2019. P. 559;
https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_59
13. *The Earth's Electrical Environment*. Washington, DC: The National Academies Press, 1986;
<https://doi.org/10.17226/898>
14. Golubenko K., Rozanov E., Mironova I., Karagodin A., Usoskin I. // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 12. e2020GL088619;
<https://doi.org/10.1029/2020GL088619>
15. Klimenko V.V., Denisenko V.V., Klimenko M.V. // *Rus. J. Phys. Chem. B* 2022. V. 16. № 5. P. 1008.
<https://doi.org/10.1134/S1990793122050219>
16. Denisenko V.V., Pomozev E.V. // *J. Comp. Tech.* 2010. V. 15. P. 34.
17. Mareev E.A. // *Phys. Usp.* 2010. V. 53. P. 504.
<https://doi.org/10.3367/UFNe.0180.201005h.0527>
18. Denisenko V.V., Rozanov E.V., Belyuchenko K.V. et al. // *Proc. VIII Int. Conf. "Atmosphere, Ionosphere, Safety (AIS-2023)"*. Kaliningrad, 2023. P. 117.
19. Schraner M., Rozanov E., Schnadt Poberaj C. et al. // *Atmosph. Chem. Phys.* 2008. V. 8. № 19. P. 5957;
<https://doi.org/10.5194/acp-8-5957-2008>