

Анализ вероятной причины распространения электромагнитных полей частотой 50 Гц на приполярных территориях Урала

Николай Витальевич БОБРОВНИКОВ
Владислав Анатольевич ЩАПОВ*
Анатолий Константинович ЮРКОВ**

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность работы обусловлена низким уровнем использования такого источника переменного тока, как частота 50 Гц. В объединенных системах России напряжения составляют 500, 750, 1150 кВ и имеют место в спектре шумановских резонансов. На этих частотах в атмосфере очень мало затухания (1 дБ на 10 000 км), следовательно, волны чрезвычайно низких частот в любой точке планеты способны распространяться за счет естественного волновода, образованного ионосферой и поверхностью Земли.

В статье анализируются причины широкого распространения промышленных помех частотой 50 Гц. Указано влияние приземного слоя электрических зарядов, называемого в метеорологии «электродным эффектом», и рассмотрена его генерация в результате распада атомов приземного слоя радона.

Цель работы заключается в разработке новых методов электроразведки для проведения геолого-геофизических исследований на приполярном Урале, основанных на использовании электромагнитных полей – помех для решения геологических задач. Группа новых методов получила общее наименование ТЭМП (методы техногенного электромагнитного поля) и позволила освободиться от необходимости использования длинных измерительных линий и тяжелых генераторных устройств при решении задач геологического картирования, что облегчило организацию исследований как на равнинных территориях, так и на труднодоступных участках.

Методы исследования – электроразведка методом профилирования с применением токов промышленной частоты 50 Гц без питающих токовых линий возбуждения поля.

Результаты и выводы. Исследование показало, что применение токов промышленной частоты 50 Гц, ранее считающихся помехами при электроразведочных работах, вполне обоснованно. Распределенный источник возбуждения поля позволяет использовать методы профилирования на высокоомных участках и в зоне вечной мерзлоты.

Ключевые слова: токи промышленной частоты 50 Гц, поиски рудных месторождений, электроразведка, метод профилирования, методы техногенного электромагнитного поля (ТЭМП), зона высокоомных пород, вечная мерзлота.

Введение

Как известно, интенсивные электромагнитные поля промышленного происхождения создают большие помехи при проведении электроразведочных работ. В конце XX в. Институту геофизики УрО РАН удалось разработать несколько методов электроразведки, основанных на использовании самих электромагнитных полей – помех для решения геологических задач. Вся группа новых методов была объединена под общим наименованием ТЭМП (методы техногенного электромагнитного поля). Новые методики позволили освободиться от необходимости использования длинных измерительных линий и тяжелых генераторных устройств при решении задач геологического картирования, что облегчило организацию исследований как на равнинных территориях, так и на труднодоступных участках [1–3].

Новую методику с успехом применяли на Среднем Урале, а однажды представилась возможность попытки

выполнения по методике ТЭМП геологического картирования на Приполярном Урале, на расстоянии более 700 км от промышленных центров. Оказалось [4], что электромагнитное поле промышленной частоты 50 Гц с интенсивностью, достаточной для проведения геофизических работ, обнаруживается и на отдаленных приполярных территориях. В этом нет ничего необычного, ведь пик на 50 Гц в спектре электромагнитных колебаний сверхнизкой частоты с резонансами Шумана обусловлен частотой переменного тока в промышленной электросети с учетом высокой проводимости Земли и ионосферы [5].

На рис. 1 изображен план кажущихся сопротивлений с результатами геоэлектрического картирования участка на вершине хребта Малдындыр Приполярного Урала. Участок находится в зоне вечной мерзлоты, северная

✉vlad-shchapov@yandex.ru
**akyurkov@mail.ru

часть перекрыта курумником, южная представлена моренными отложениями.

В ходе измерений на плато с курумником было обнаружено необычное явление – на каждом пикете, пока измерительный электрод не был заземлен, стрелку аналогового прибора зашкаливало очень сильным полем.

Высокая напряженность электрического поля промышленной частоты в воздухе в Приполярном регионе была обнаружена впервые. Был пройден дополнительный профиль ТЭМП по тундре, от хребта Малдынырд до реки Пелингичей. По результатам измерений вычислена энергия электромагнитного поля ТЭМП для каждого из пикетов. График изменений энергии приведен на рис. 2.

Полученные результаты демонстрируют неравномерное распределение энергии поля по площади. Экстремальные значения, вероятно, тяготеют к зонам субмеридиональных тектонических нарушений.

Опытом предыдущих работ было доказано, что, обладая низкой частотой (50 Гц) и высокой интенсивностью, техногенное электромагнитное поле способно достигать рудных зон на глубине до 1000 м при удельном сопротивлении вмещающих пород выше 1000 Ом · м [6]. Одна из причин распространения электромагнитного поля ТЭМП на удаленные от промышленных районов территории – большая длина электромагнитной волны, равная 6000 км для основной гармоники частотой 50 Гц. Но все эти известные факты не объясняют причину наличия электрического поля промышленной частоты на вершине горы, в зоне альпийской тундры Приполярного Урала.

Публикаций о подобных проблемах в других методах полевой электроразведки немного, например работы Т. А. Ласкиной в Пермском государственном национальном исследовательском университете [7]. В ходе поиска объяснения были изучены исследования в параллельной области, касающейся атмосферного электричества [5, 8–10]. В этих работах анализируется более сложная модель распределения электрических зарядов в атмосфере Земли, чем обычно учитывается в полевой геофизике. Кроме общеизвестного слоя ионосферы рассматривается не так широко известный приповерхностный слой электрических зарядов мощностью около 3 м, называемый «экраным эффектом».

Влияние этого слоя на результаты геоэлектрических измерений при решении геологических задач не учитываются. Предполагается, что «эффект» возникает в результате истечения на поверхность Земли из недр ионов разного происхождения, а в первую очередь эксхалиции инертного радиоактивного газа радон с последующим распадом его атомов. Электрический заряд слоя отрицательный, что указывает на преобладание свободных электронов.

Изучением радона давно занимаются сотрудники лаборатории геодинамики Института геофизики УрО РАН

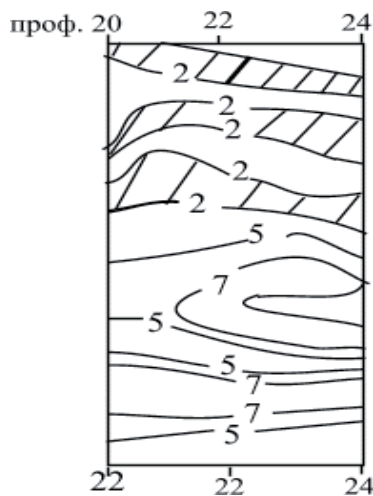


Рисунок 1. План кажущихся сопротивлений: цифры на кривых – обозначения изолиний кажущегося сопротивления, тыс. Ом · м; заштрихованная часть плана соответствует положению выявленного рудопроявления

Figure 1. Apparent resistivity plan: numbers on the curves indicate apparent resistivity isolines, thous. Ohm · m; the shaded part of the plan corresponds to the position of the identified ore occurrence

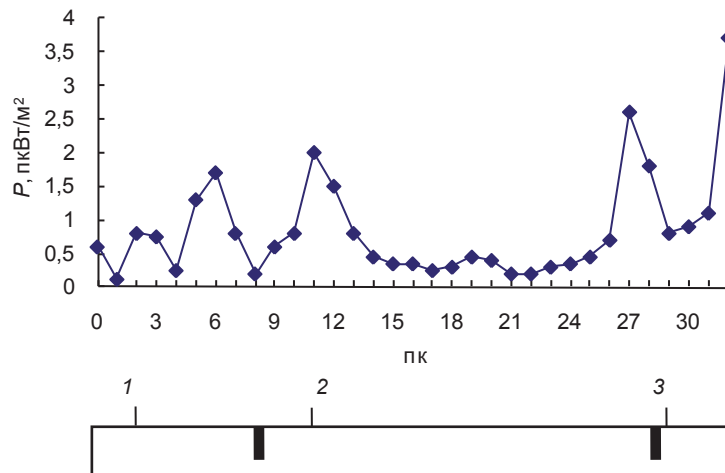


Рисунок 2. Результаты измерений плотности энергии техногенного поля по профилю Алькес-Вож–Пелингичей: 1, 2, 3 – местные ориентиры: 1 – руч. Алькес-Вож, 2 – р. Балбанью, 3 – руч. Иркусей-Шор

Figure 2. Results of measurements of the energy density of the technogenic field along the Alkes-Vozh–Pelingichi profile: 1, 2, 3 – local landmarks: 1 – Alkes-Vozh stream, 2 – Balbanyu river, 3 – Irkusey-Shor stream; explanation is in the text

в связи с выявлением предвестников землетрясений и других геодинамических событий [11, 12], это позволило объединить усилия двух методических направлений для решения одной важной задачи – установления причин, способствующих распространению электромагнитных полей индустриального происхождения на приполярные территории Урала. Нужен был ответ на вопрос: способен ли этот слой аналогично ионосфере отражать часть энергии, уменьшая долю, проникающую в недра Земли.

Начальные условия:

1. Атмосфера Земли образована смесью газов, которые в нормальных условиях являются электрическими изоляторами. В поле земного притяжения газы распределяются по вертикали в зависимости от плотности – плотные газы в нижних слоях, легкие вытесняются вверх. Самый легкий из газов – водород, самый плотный – радон. Плотность радона приблизительно в 8 раз больше, чем средняя для воздуха.

2. Радон – нейтральный газ. Радиоактивен, период полураспада самого устойчивого из изотопов ^{222}Rn – 3,8 сут. При распаде он выделяет частицы α , β и излучение γ -спектра.

Рассмотрим вероятный процесс формирования слоя электрических зарядов на поверхности Земли за счет радона. Радон – радиоактивный инертный газ, который повсеместно проникает из земли в атмосферу (процесс этот называется эксхалляцией), газ скапливается в пониженных местах и постепенно распадается по одному из вариантов сложной схемы, изображенной на рис. 3. Радон находится на заключительном участке ряда распада изотопов уран–радий–радон–свинец, причем, в отличие от предыдущих превращений, распад радона возможен по нескольким вариантам, как это изображено на схеме, где ниже радона изображены его дочерние продукты распада (ДПР). В процессе распада до свинца-210 атом радона и его ДПР образуют последовательно четыре альфа-частицы и четыре бета-частицы. Суммарная энергия ионизирующего излучения при распаде одного атома радона составляет $55,6 \cdot 10^{-12}$ Дж/Бк. Часть этой энергии тепловая, а часть затрачивается непосредственно на ионизацию газов воздуха. Энергия, потребляемая при ионизации кислорода, составляет 1313,9 кДж/моль, азота – 1402,3 кДж/моль [10]. Основной компонент атмосферы – азот, для него и выполняется оценочный расчет. На ионизацию одного атома азота необходим удельный расход энергии $1402,3/6,022 \cdot 10^{23} = 2,33 \cdot 10^{-18}$ Дж.

Вслед за тем рассчитывается плотность газа образующихся ионов азота для приповерхностного слоя воздуха при средней плотности эксхалляции радона 250 Бк/м^3 :

$$n_{N^+} = n_{e^-} = 250 \cdot 55,6 \cdot 10^{-12} / 2,33 \cdot 10^{-18} = 6 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}.$$

Затем рассчитывается вероятная напряженность электрического поля в воздухе, вызванная ионизацией воздуха под действием распада радона. При этом используются зависимости дивергенции плотности потока электрического смещения. При распаде атома наибольшая

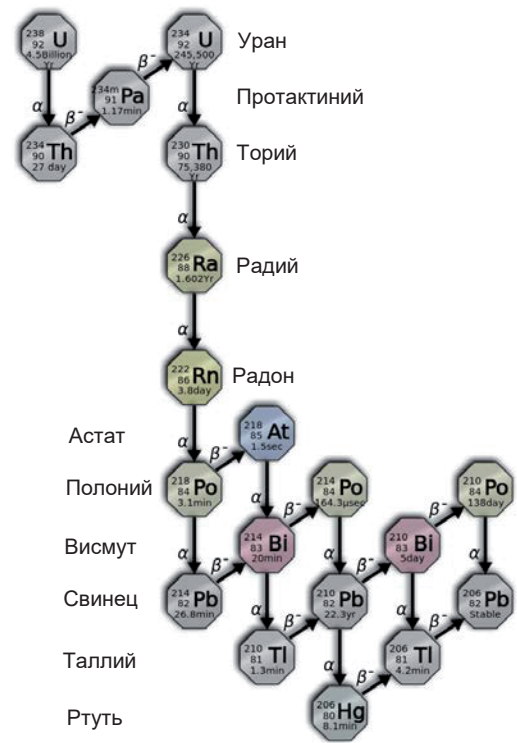


Рисунок 3. Ряд распада уран–радон–свинец-210
Figure 3. Uranium–radon–lead-210 decay series

кинетическая энергия остается у электронов, по ним и считается дивергенция:

$$\text{Div } D = \rho,$$

$$dDx/dx = dDy/dy = 0 \text{ – слой считается однородным;}$$

$$dDz/dz = e dEz/dz = e Ez = \rho = n_e e,$$

где e – заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $\epsilon = \epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость воздуха, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ρ – плотность электрических зарядов, Кл/м³;

$$Ez = N_e \cdot e / \epsilon_0 = 6 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} / 8,85 \cdot 10^{-12} = 110 \text{ В/м.}$$

По данным метеорологических наблюдений, средняя напряженность вертикальной компоненты электрического поля в нижнем слое атмосферы, на поверхности Земли 100–150 В/м. Таким образом, приходим к заключению, что в приповерхностном слое атмосферы в месте с нейтральными атомами газов присутствуют их ионы. В теоретической физике смесь нейтральных молекул газа с заряженными частицами называется плазмой. Поскольку не учитывается вклад космических лучей, то всю смесь, которая подверглась анализу, следует отнести к разряду холодной плазмы.

Основными параметрами плазмы является концентрация заряженных частиц и температуры, заряженных и нейтральных частиц; n_e – плотность электронов в плазме; n_0 – количество молекул в одном кубометре воздуха. Количество молекул газа рассчитывается с помощью табличных значений числа Авогадро и количества молей в

1 м³ газа ($n_0 = 44,6 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} = 2,7 \cdot 10^{25}$ м⁻³).
Отношение

$$\delta = \frac{n_e}{n_e + n_0} \approx 10^{-15}$$

показывает низкую степень ионизации [13].

Энергии различных типов частиц, составляющих плазму, могут отличаться. В таком случае плазму нельзя охарактеризовать одним значением температуры T , но в ориентировочных расчетах будем считать ее изотермической с температурой 300 К.

Условие газообразного состояния среды

$$kT \gg e^2 N_e^{1/3}. \quad (1)$$

Сопоставим кинетическую энергию частиц плазмы $E_k \approx kT$ с энергией кулоновского взаимодействия между электронами $E_e \approx e^2/l$ (здесь k – постоянная Больцмана; T – температура, К; l – среднее расстояние между частицами). Примем расстояние между частицами равным радиусу Дебая:

$$r_D = \left(\frac{\epsilon kT}{ne^2} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

В нашей задаче $r_D = (\epsilon kT/e^2 n_e)^{1/2} \approx 1,3 \cdot 10^{-2}$ м.
Энергия кулоновского взаимодействия

$$E_e = (1,6 \cdot 10^{-19})^2 / 1,3 \cdot 10^{-2} \approx 2 \cdot 10^{-36} \text{ Дж.}$$

Кинетическая энергия $kT = 1,380 \cdot 10^{-23} \cdot 300 = 4,14 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Следовательно, условие (1) выполняется даже для изотермической плазмы, хотя известно, что энергия электронов в результате ионизации атома гораздо выше, чем у ионов.

Рассмотрим распространение плоской волны в однородном ионизированном газе с электронной плотностью n_e . Влияние ионов и нейтральных молекул не учитываем, т. е. предположим, что газ содержит только электроны. Поляризация ионизированного газа происходит благодаря тому, что под действием электрического поля проходящей волны электроны смещаются относительно равновесного положения в направлении, обратном направлению вектора напряженности электрического поля. Среднее значение электрического момента единицы объема газа определяют как произведение величины заряда на смещение этого заряда относительно начального положения:

$$\vec{p}_e = en_e \vec{l}_e, \quad (3)$$

где n_e – электронная плотность; l_e – среднее значение смещения электрона относительно равновесного положения.

Смещение электрона l_e определим из уравнения движения электрона, которое можно записать в скалярной форме, поскольку векторы смещения и напряженности поля параллельны:

$$m_e \frac{d^2 l_e}{dt^2} = -eE, \quad (4)$$

где m_e – масса электрона, кг, $m_e = 9,106 \cdot 10^{-31}$.

Поскольку рассматриваются гармонические колебания $E = E_m e^{i\omega t}$, решение этого уравнения запишем в виде

$$l_e = \frac{e}{m_e \omega^2} E_m e^{i\omega t} + l_t = \frac{e}{m_e \omega^2} E + l_t. \quad (5)$$

Произвольную постоянную l_t определяем из того условия, что при отсутствии поля ($E = 0$) имеется только тепловое движение электронов и, следовательно, смещение электрона l_e есть смещение под действием теплового движения электронов. Тепловое движение носит хаотический характер, поэтому усредненное значение смещения под действием теплового движения электронов равно нулю. Таким образом,

$$l_e = \frac{e}{m_e \omega^2} E. \quad (6)$$

Под влиянием внешнего электрического поля диэлектрическая проницаемость газа изменяется за счет поляризации, которая определяется восприимчивостью к воздействию:

$$\epsilon = 1 + \chi; \quad p = \epsilon_0 \chi E, \quad (7)$$

где χ – восприимчивость.

Подставив (6) в (3), получим:

$$P = -\frac{e^2 n_e}{m_e \omega^2} E; \quad (8)$$

$$X = -\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e \omega^2} = -\frac{\omega_0^2}{\omega^2},$$

где ω_0^2 – плазменная частота; $\omega_0 \sim 5,1 \cdot 10^6$ с⁻¹, $\omega = 314$ с⁻¹.

Далее запишем формулу диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}. \quad (9)$$

Полученное выражение показывает, что для низкочастотных волн диэлектрическая проницаемость ионизированного газа является отрицательной величиной.

Известно, что плазма с отрицательной диэлектрической проницаемостью непроницаема для низкочастотного электромагнитного поля [13], следовательно, она может играть роль отражателя, уменьшающего количество энергии ТЭМП, способной проникнуть через земную поверхность. Это свойство отражателя и обеспечивает техногенному электромагнитному полю возможность распространения на приполярных территориях.

Практика проведения геологического картирования по технологии ТЭМП показала, что встречаются территории, где у измеряемых сигналов очень низкая интенсивность, что снижает качество результатов. При исследовании таких участков было обнаружено два. Первый – низина в среднем течении реки Малая Тынагота на Приполярном Урале, второй – долина ЮБК в Крыму. Возможно, причина в том, что в пониженных местах скапливается

слишком много радона и формируется плотный зеркальный слой.

В статье показана возможность использования токов промышленной частоты 50 Гц для электроразведки, в ситуации невозможности проведения гальванического заземления питающих электродов. Распределенный источник возбуждения поля позволяет использовать методы профилирования на высокоомных участках и в зоне вечной мерзлоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобровников Н. В. Методические предпосылки использования электромагнитного поля промышленных помех для геоэлектроразведки // Электромагнитные методы геофизических исследований. Свердловск, 1988. С. 79–84.
2. Пат. RU 2 107 932 С1. Способ геоэлектроразведки / Н. В. Бобровников; заявл. 03.10.96; опубл. 27.03.98.
3. А. с. 1552837 СССР, МКИ ЗФ 04 5/42. Способ геоэлектроразведки / Н. В. Бобровников; заявл. 6.05.16; опубл. 12.02.98.
4. Бобровников Н. В. О возможности использования промышленных электромагнитных полей при геологическом картировании на Приполярном Урале // Теория и практика геоэлектрических исследований: сб. науч. трудов. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. Вып. 2. С. 189–193.
5. Секреты синхронизации электромагнитных полей Земли и живого организма. 2020. URL: <https://habr.com/ru/companies/ua-hosting/articles/501524/>
6. Бобровников Н. В. Решение квазислоистых задач при профилировании по методу ТЭМП // Теория и практика геоэлектрических исследований. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. С. 123–130.
7. Ласкина Т. А. Разработка технологии комплексного электрометрического мониторинга в условиях соляных месторождений: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2018. 130 с.
8. Морозов В. Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. СПб: РГГМУ, 2011. 253 с.
9. Шулейкин В. Н., Шукин Г. Г., Куповых Г. В. Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. СПб: РГГМУ, 2015. 206 с.
10. Редин А. А., Клово А. Г., Куповых Г. В., Морозов В. Н. Электродинамическая модель атмосферного приземного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 8(97). С. 93–96. <https://elibrary.ru/kvhiml>
11. Козлова И. А., Бирюлин С. В., Юрков А. К. Поведение аномалий объемной активности почвенного радона во время подготовки тектонических землетрясений // Литосфера. 2021. Т. 21. № 5. С. 724–733. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733>
12. Пестова О. В., Пестов Д. А., Шишени А. В. Моделирование процессов переноса подпочвенного радона в грунте и его эксхалации в приземный слой атмосферы // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 871–879.
13. Электродинамика плазмы / под ред. А. И. Ахиезера. М.: Наука, 1974. 720 с.
14. Давыдов В. А. Изучение поляризационных эффектов с помощью техногенного электромагнитного поля // Известия УГГУ. 2022. Вып. 3(67). С. 70–79. <http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-70-79>

Статья поступила в редакцию 14 октября 2024 года

Analysis of the probable cause of the propagation of electromagnetic fields with a frequency of 50 Hz in the subpolar territories of the Urals

Nikolay Vital'evich BOBROVNIKOV
Vladislav Anatol'evich SHCHAPOV*
Anatoliy Konstantinovich YURKOV**

Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

The relevance of the work is due to the low level of use of such an alternating current source as a frequency of 50 Hz. In the united systems of Russia, the voltages are 500, 750, 1150 kV and occur in the spectrum of Schumann resonances. At these frequencies in the atmosphere there is very little attenuation (1 dB per 10,000 km), therefore, waves of extremely low frequencies are capable of propagating at any point on the planet due to the natural waveguide formed by the ionosphere and the surface of the Earth.

The article analyzes the reasons for the widespread use of industrial interference with a frequency of 50 Hz. It indicates the influence of the ground layer of electric charges, called in meteorology the “electrode effect”, and considers its generation as a result of the decay of atoms of the ground layer of radon.

The purpose of the work is to develop new methods of electrical exploration for conducting geological and geophysical research in the polar Urals, based on the use of electromagnetic fields – interference for solving geological problems. A group of new methods received the general name TEFM (technogenic electromagnetic field methods) and made it possible to get rid of the need to use long measuring lines and heavy generator devices when solving geological mapping problems, which facilitated the organization of research both in flat areas and in hard-to-reach areas.

Research methods. Electrical exploration by the profiling method using currents of industrial frequency of 50 Hz without supply current lines of field excitation.

Results and conclusions. The study showed that the use of currents of industrial frequency of 50 Hz, previously considered interference in electrical exploration works, is quite justified. The distributed source of field excitation allows using profiling methods in high-resistance areas and in the permafrost zone.

Keywords: 50 Hz industrial frequency currents, prospecting for ore deposits, electrical exploration, profiling method, technogenic electromagnetic field methods (TEFM), zone of high-resistivity rocks, permafrost.

REFERENCES

1. Bobrovnikov N. V. 1988, Methodological prerequisites for using the electromagnetic field of industrial interference for geoelectric exploration. *Electromagnetic methods of geophysical research. Sverdlovsk*, pp. 79–84. (*In Russ.*)
2. Pat. RU 2 107 932 C1. Bobrovnikov N. V. 1998, Method of geoelectric exploration; declared 03.10.96; publ. 27.03.98. (*In Russ.*)
3. C. c. 1552837 USSR, МКИ 3F 04 5/42. Bobrovnikov N. V. 1998, Method of geoelectric exploration. declared 16.05.16; publ.12.02.98. (*In Russ.*)
4. Bobrovnikov N. V. 2000, On the possibility of using industrial electromagnetic fields in geological mapping in the Subpolar Urals. *Theory and practice of geoelectric research: collection of scientific papers. Ekaterinburg*, issue 2, pp. 189–193. (*In Russ.*)
5. 2000, Secrets of synchronization of electromagnetic fields of the Earth and a living organism. (*In Russ.*) URL: <https://habr.com/ru/companies/ua-hosting/articles/501524/>
6. Bobrovnikov N. V. 1998, Solution of quasi-layered problems in profiling using the TEFM method. *Theory and practice of geoelectric research. Ekaterinburg*, pp. 123–130. (*In Russ.*)
7. Laskina T. A. 2018, Development of technology for complex electrometric monitoring in salt deposits, PhD thesis. Perm, 130 p. (*In Russ.*)
8. Morozov V. N. 2011, Mathematical modeling of atmospheric-electrical processes taking into account the influence of aerosol particles and radioactive substances. St. Petersburg, 253 p. (*In Russ.*)
9. Shuleikin V. N., Shchukin G. G., Kupovykh G. V. 2015, Development of methods and means of applied geophysics – atmospheric-electric monitoring of geological heterogeneities and zones of geodynamic processes. St. Petersburg, 206 p. (*In Russ.*)
10. Redin A. A., Klovo A. G., Kupovykh G. V., Morozov V. N. 2009, Electrodynamical model of the atmospheric surface layer. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskkiye nauki* [News of SFedU. Technical sciences], no. 8 (97), pp. 93–96. (*In Russ.*) <https://elibrary.ru/kvhiml>
11. Kozlova I. A., Biryulin S. V., Yurkov A. K. 2021, Behavior of anomalies of volumetric activity of soil radon during preparation of tectonic earthquakes. *Litosfera* [Lithosphere], vol. 21, no. 5, pp. 724–733. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733>
12. Pestova O. V., Pestov D. A., Shishenya A. V. 2013, Modeling of the processes of subsurface radon transfer in the soil and its exhalation

✉ vlad-shchapov@yandex.ru

**akyurkov@mail.ru

into the surface layer of the atmosphere. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], no. 6, pp. 871–879. (*In Russ.*)

13. Akhiezer A. I. 1974, Plasma Electrodynamics, Moscow, 720 p. (*In Russ.*)

14. Davydov V. A. 2022, Study of polarization effects using a man-made electromagnetic field. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 3 (67), pp. 70–79. (*In Russ.*) <http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-70-79>

The article was received on October 14, 2024