

Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт  
Государственного комитета РФ по высшему образованию

---

П р е п р и н т    N 402

**ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ,  
ОБУСЛОВЛЕННЫЕ  
РОСТОМ ТЕХНИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА  
ЧЕЛОВЕЧЕСТВА**

Митяков Н. А.,  
Рахлин А. В.,  
Митякова Э. Е.,  
Выборнов Ф. И.

Нижегород, 1994

Митяков Н. А., Рахлин А. В., Митякова Э. Е.,  
Выборнов Ф. И.

**ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ  
РОСТОМ ТЕХНИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ЧЕЛОВЕЧЕСТВА.**  
// Препринт N 402. — Нижний Новгород: НИРФИ, 1994.  
— 15 с.

УДК 550.388.2

Развитие цивилизации неизбежно вызывает проблему загрязнения окружающей среды. Деятельность человека, как правило, находится в вопиющем противоречии с законами природы, а меры, предпринимаемые для уменьшения вреда природе (очистные сооружения, экономия сырья и энергии и т.д.) являются всего лишь попыткой смягчить последствия вмешательства человека в природу. Обычно вопросы экологии затрагивают непосредственно среду обитания растений и животных — нижнюю атмосферу, воду, почву. В последнее время, однако, этот круг расширяется. Всем известна проблема "озоновых дыр", которую связывают, в основном, с загрязнением фреоном верхних слоев атмосферы. Серьезной становится проблема загрязнения ближнего космоса обломками космических ракет и спутников, закончивших активное существование. Тонны продуктов сгорания топлива доставляются на различные высоты атмосферы во время запусков космических аппаратов. Возмущения нейтральной компоненты атмосферы (включая загрязнение различными газами), воздействие акустических и электромагнитных волн приводят к нарушению баланса ионизации в ионосфере, к различного рода неустойчивостям, вызывающим возмущения концентрации электронов.

Возмущения ионосферы антропогенного характера необходимо учитывать прежде всего при построении физических моделей ионосферы, в задачах прогнозирования состояния ионосферы и ионосферного распространения радиоволн. С ростом технического потенциала эта проблема будет приобретать все более и более важное значение.

Технический потенциал человечества в первом приближении можно измерить мировым производством электроэнергии.

По данным, приведенным в [1], в 1978 г. суммарная мощность электростанций составляла  $W_{1978}=1830$  ГВт, в 1980 г.  $W_{1980}=2030$  ГВт. Прогнозные значения  $W$  в 2000 г. составляют  $W_{2000} \simeq 5230-6200$  ГВт, т.е. величина  $W$  возрастает примерно в 1.7 раз в 10 лет. Полное энерговыделение при сжигании всех видов топлива в 1980 г. в 4 раза превышало значение  $W_{1980}$  и составляло 8038 ГВт, а к 2000 г. прогнозируется величина  $\Sigma W_{2000} \sim 20\,000$  ГВт. Согласно [1] считается, что климат Земли практически не изменится, если энерговыделение не будет превышать  $1Q=3.35 \cdot 10^4$  ГВт<sup>1</sup>. Это означает, что к 2000 году человечество приблизится к опасной черте, за которой могут начаться необратимые изменения в климате.

---

<sup>1</sup>Мощность солнечного потока, закрываемого диском Земли, составляет  $\pi R^2 \cdot S_h = 1.72 \cdot 10^8$  ГВт  $\approx 5.3 \cdot 10^3 Q$  \*

Эта краткая справка о развитии технического потенциала человечества дает основание считать, что проблема антропогенного воздействия на ионосферу приобретает исключительно важное значение.

Источники антропогенного воздействия на ионосферу можно разбить на три группы:

1. Химические загрязнения атмосферы продуктами сгорания топлива на активном участке космических ракет или в результате переноса реагентов (например, фреона) с поверхности Земли в верхнюю атмосферу.
2. Воздействие акустическими волнами, источниками которых являются сверхзвуковые самолеты, стартующие ракеты, мощные наземные взрывы, низколетящие спутники.
3. Воздействие электромагнитными полями, излучаемыми радиостанциями, линиями электропередач, электропоездами и т.д.

В каждой группе источников известны яркие и достаточно хорошо изученные примеры антропогенного воздействия на ионосферу. Однако цельную картину, учитывающую все виды воздействия, вряд ли возможно составить в ближайшее время.

Рассмотрим кратко основные достижения и сформулируем направления дальнейших исследований по каждой группе источников антропогенного воздействия на верхнюю атмосферу.

1. Химические загрязнения верхней атмосферы. Каждый запуск космического аппарата сопровождается образованием "дыры" в ионосфере. Это обусловлено работой ракетного двигателя, в продуктах сгорания которого имеется водяной пар. Присутствие воды даже в малых количествах резко увеличивает коэффициент рекомбинации электронов и на высотах E и F областей существенно (на порядок) уменьшается плотность плазмы, причем время жизни "ионосферных дыр" измеряется часами, а их горизонтальные размеры со-

ставляют сотни км [2]. В результате вертикальных и горизонтальных движений в атмосфере продукты сгорания ракетного топлива переносятся на тысячи км и постепенно загрязняют всю верхнюю атмосферу. Если считать, что загрязнения распределяются равномерно вокруг земного шара в слое, толщиной  $\Delta h = 100$  км, то каждый запуск ракеты с весом топлива  $M = 4$  т дает концентрацию загрязнений молекулами воды  $N_{H_2O} = 3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ . Несколько десятков запусков достаточно для того, чтобы концентрация  $H_2O$  достигла концентрации ионосферной плазмы  $N_e \sim 3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  и "ионосферная дыра" займет всю ионосферу Земли. Ситуация облегчается тем, что в результате фотохимических реакций  $H_2O$  трансформируется в другие газы:  $H_2O + h\nu \rightarrow H + OH \rightarrow 2H + O$ . Мы не имеем, однако, данных о сечениях подобных реакций, чтобы сделать более достоверные оценки.

Более проблематичным является механизм доставки малых примесей в верхнюю атмосферу из пограничного слоя или из стратосферы. Например, оценки времени переноса примесей на высоты озоносферы (30 – 40 км) согласно [2] составляют десятилетия. С другой стороны хорошо известно, что на высотах 60 – 80 км в D-области имеется достаточное количество ионов-связок  $(H_2O)_n$ , чтобы существенно изменить концентрацию электронов. Несомненно, что требуется дополнительный анализ механизма переноса примесей в верхнюю атмосферу, чтобы сделать количественную оценку его влияния на ионосферу.

2. Воздействие на ионосферу акустическими волнами.  
 Акустические (АВ) и акустико-гравитационные волны (АГВ) вызывают возмущения нейтральной атмосферы и, как малой примеси, электронной плотности ионосферы. В качестве источников АГВ обычно рассматривают землетрясения, извержения вулканов, ураганы, полярные сияния. Не-

льзя, однако, игнорировать и "рукотворные" источники АВ и АГВ: наземные взрывы, сверхзвуковые самолеты, запуски космических объектов, сверхзвуковые движения низколетающих космических объектов.

Ярким примером "рукотворного" воздействия на ионосферу АВ и АГВ была операция "МАССА" 28 ноября 1981 г., когда вблизи г. Алма-Ата был произведен взрыв 288 т тринитротолуола [4]. Энергия взрыва составляла  $P_0 \approx 10^{12}$  дж. Через 8 минут акустическая волна достигла высоты 100 км и вызвала доплеровский сдвиг частоты  $\Delta f \sim 0.5$  Гц длительностью  $\tau_E \sim 10$  с на частоте  $f_E = 2$  МГц. На высоте 200 км доплеровский сдвиг составлял  $\Delta f \sim 1$  Гц длительностью  $\tau_F \sim 1$  минута на частоте  $f_F \approx 4.9$  МГц. Возмущения в слое F ионосферы были обнаружены на ионограммах в виде перемещающихся возмущений (ПВ) в Караганде и Ташкенте (расстояния  $D \sim 700$  км от эпицентра). Длительность ПВ составляла 5 – 10 минут, что характерно для АГВ.

Несомненно, что основная часть энергии акустических волн поглощается в нижней атмосфере вследствие вязкости. В верхнюю атмосферу проходят лишь низкочастотные АВ с периодом  $\tau_E > 10$  с и  $\tau_F > 60$  с. На дальние расстояния от эпицентра приходят лишь АГВ с периодом  $\tau \geq 10$  мин.. Если принять, что длительность наземного взрыва составляет  $\tau_0 \sim 1$  мс, то энергия, доставляемая АВ на высоту 200 км составит  $P_F \leq P_0 \frac{\tau_0}{\tau_F}$ . Для операции МАССА  $P_0 \leq 10^7$  дж. Из этой грубой оценки следует исходить, когда рассматриваются другие источники АВ и АГВ. Например, при вхождении ИСЗ в нижние слои атмосферы (высота  $\sim 200$  км) спутник массой  $M \sim 0.1$  т со скоростью  $v = 8$  км/сек имеет энергию  $\frac{Mv^2}{2} \sim 3 \cdot 10^9$  дж. Следовательно, во время торможения спутник выделяет энергию, превышающую на высоте 200 км энергию взрыва во время операции МАССА и должен являться источником сильных АВ и АГВ, возмущающих по-

носферу. Более строгие оценки антропогенных источников АВ и АГВ и их влияния на ионосферу могут быть получены в результате дополнительного исследования.

3. Воздействие на ионосферу электромагнитными полями. Возможность воздействия на ионосферу сильными электромагнитными полями не вызывает сомнений. Хорошо изучены физические эффекты, возникающие при воздействии на ионосферу мощными потоками КВ излучения (см., например, [5]). Если частота волны близка к плазменной или верхнегибридной частоте ( $\omega = \omega_{pe}, \omega = \sqrt{\omega_{pe}^2 + \omega_{H}^2}$ ), а плотность энергии волны превышает пороговую величину, в ионосфере возбуждается неустойчивость, которая является причиной искусственных возмущений ионосферы различных масштабов, начиная от радиуса Дебая  $d_e \sim 1$  см и кончая размерами возмущенной области  $D \sim 100$  км. Возмущения ионосферной плазмы, а также КНЧ-ОНЧ излучения различных пространственных масштабов могут регистрироваться при этом не только в области F-слоя над возмущающим КВ передатчиком, но и в магнитосопреженной с ней области ионосферы<sup>2</sup>. Искусственная ионосферная турбулентность вызывает аномальное ослабление радиоволн, мерцания интенсивности сигналов, явления типа F-spread. Пороговые мощности наземного передатчика с учетом коэффициента усиления антенны не превышают  $PG \sim 5$  МВт, что соответствует потоку энергии на высоте 250 км  $P_{пор} = 6$  Вт/км<sup>2</sup>. Если частота волны превышает плазменную ( $\omega > \omega_{pe}$ ), то эффекты воздействия на ионосферу резко падают. Так, при наклонном падении пучков радиоволн на ионосферу требуются достаточно тонкие измерения, чтобы выявить эффекты воздействия [6]. Согласно [7] при мощности передатчика  $PG \sim 100$  МВт на частоте 15 МГц изменения плотности электронов в вершине

---

<sup>2</sup>В [11] предложена версия генерации подобных ионосферных возмущений от счет искусственных перемежающихся возмущений, время жизни которых превышает 1 час.

первого скачка не превосходят  $\frac{\Delta N}{N} \leq 1 \div 5\%$ . На более высоких частотах следует ожидать падения эффекта  $\frac{\Delta N}{N} \sim \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$ .

В [9,10] приведены данные о загрузке КВ диапазона. В 1970 г. число линий связи в диапазоне 3–10 МГц составляло  $N \sim 10^6$ . На участке 5 – 5.1 МГц на полосу  $\Delta f = 1$  кГц приходилось 35 передатчиков с суммарной мощностью  $W_{\Delta f=1} = 30$  кВт, а на участке 15.6 – 15.625 кГц на полосу 1 кГц соответственно 15 передатчиков и  $W_{\Delta f=1} > 400$  кВт. Эксперименты, проведенные в Горьком [5], показывают, что расширение полосы частот волны накачки до  $\Delta f \sim 200$  кГц не влияют на пороги параметрической неустойчивости. Если считать, что в наиболее "опасном" диапазоне частот 5 – 10 МГц (где частота близка к плазменной частоте ионосферы) мощность передатчиков на полосу  $\Delta f = 1$  кГц составляла 100 кВт, то в полосе  $\Delta f = 200$  кГц суммарная мощность будет составлять  $W_{\Delta f=200} = 20$  МВт.

Следуя [1] можно сделать прогноз, что в 2000 году суммарная мощность возрастет в 5 раз и будет составлять  $W_{\Delta f=200} = 100$  МВт. Мощные радиостанции группируются в промышленно развитых районах Европы и Америки. Будем считать, что площадь таких районов составляет  $10^7$  км<sup>2</sup> и, следовательно, плотность потока энергии в ионосфере будет составлять  $P \sim 10$  вт/км<sup>2</sup>, что превышает  $P_{пор} = 6$  вт/км<sup>2</sup>. Поэтому, если в данный период только отдельные, наиболее мощные радиостанции, могут создавать в ионосфере поля, превышающие пороговые, и модифицировать ионосферу, то через 10 лет это может стать ординарным явлением. Тем не менее, чтобы сделать более корректные оценки, необходимо иметь значительно более полные, чем в [9] данные о радиопередатчиках и прогнозах их развития.

Меньше изучены эффекты воздействия на ионосферу радиоволнами СВ, ДВ и СДВ диапазонов. Скорее всего, волны СВ и ДВ диапазонов экранируются нижней ионосферой и, за



исключением особых случаев, не достигают высот F области. В СДВ диапазоне спиральные (свистовые) волны распространяются вдоль силовых линий геомагнитного поля. Эксперименты показывают, что свистовые волны СДВ радиостанций взаимодействуют с электронами магнитосферы и вызывают явления типа "триггерного" эффекта в низкочастотном излучении магнитосферы. Повидимому, такое взаимодействие может сопровождаться высыпаниями заряженных частиц магнитосферы в плотные слои атмосферы, что может вызывать корпускулярную ионизацию верхней атмосферы типа полярных сияний.

Недостаточно полно изучены эффекты воздействия на ионосферу СНЧ полей на частотах  $f \leq 500$  Гц. Сильные СНЧ поля возникают в земной коре в периоды подготовки и во время землетрясений и вызывают возмущения ионосферы [7]. "Рукотворные" источники СНЧ полей весьма распространены, особенно в промышленно развитых районах. Это - линии передач электроэнергии на переменном и постоянном токе, электрофицированные железные дороги. Сильные излучения в СНЧ диапазоне более вероятны в моменты аварий, когда в ЛЭП и в токовых проводах железных дорог текут аномально большие токи.

В [10] отмечается, что в ЛЭП в определенных условиях (при высокой влажности, а также при неисправностях оборудования) могут являться источниками случайного импульсного излучения с большой длительностью импульса (несколько миллисекунд), но бывают и короткие импульсы с широким спектром. Установлено, что уровни такого излучения растут начиная от напряжений 40...70 кВ в линии, а максимум спектра смещается в сторону высоких частот доходя до 10 МГц. Кроме того, обладая свойствами длинных линий ЛЭП могут иметь резонансы на некоторых частотах, что усиливает уровни излучений в отдельных частях спектра.

Задача об антропогенном воздействии на ионосферу в СНЧ диапазоне включает оценку токовых моментов, определение их конфигурации и спектров. Далее необходимо сделать расчеты распределения СНЧ возмущений в ионосфере и оценить напряженности электрического и магнитного полей на высотах F области и, наконец, провести расчеты модификации ионосферы СНЧ полями.

В последнее время стали появляться работы, в которых так или иначе затрагиваются вопросы антропогенного воздействия на атмосферу Земли [11–15]. Большая часть из них посвящена активным экспериментам в околоземной среде, результаты которых предлагается использовать в том числе и для анализа последствий антропогенных воздействий. В тоже время следует понимать, что активные эксперименты – это по сути также прямые антропогенные воздействия, о последствиях которых упоминалось выше (п.1,2). При построении физических моделей ионосферы, а также в задачах прогнозирования состояния ионосферы и ионосферного распространения радиоволн необходимо учитывать все возможные проявления антропогенных воздействий на ионосферу Земли.

Некоторые предварительные результаты исследований различных аномалий, обнаруживаемых при регистрации ионограмм вертикального зондирования ионосферы приведены в работах [16,17]. В качестве дополнительного подтверждения факта непреднамеренного антропогенного воздействия на ионосферу мы можем привести результаты выборочной обработки ионограмм ионосферной станции НИРФИ в Зименках (Н.Новгород). В ходе обработки исследовался характер появляемости и определялась величина средней интенсивности F-уровня за период наблюдений с 1964 по 1992 годы, т.е. почти за три цикла солнечной активности. На рис.1 сплошная кривая – ход числа солнечных пятен  $\bar{R}$  [18],

а пунктир – среднее значение интенсивности F-spread в январе месяце указанного года в вечерние и ночные часы (с 19.00 до 06.00 местного времени). Кроме известного факта [19] уменьшения интенсивности F-spread в период максимума солнечной активности, нами обнаружен рост средней интенсивности F-spread от цикла к циклу как в минимуме (~ 15% за цикл), так и в максимуме (~ 5% за цикл) солнечной активности, что можно объяснить ростом числа антропогенных источников возмущения.

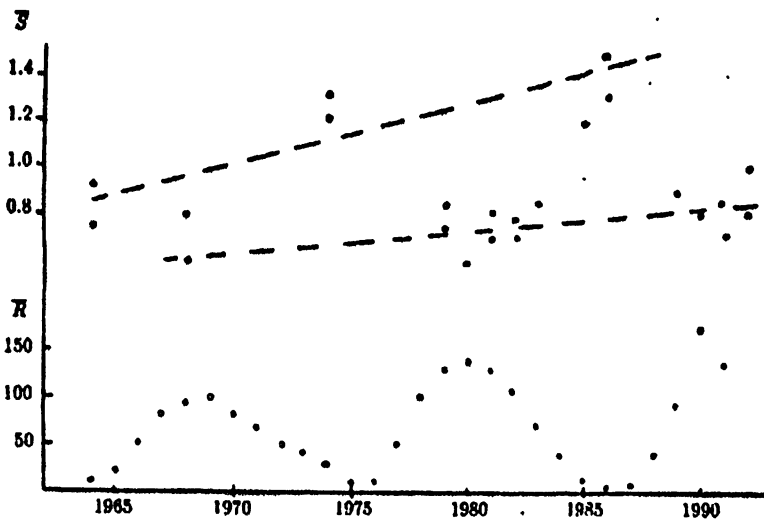


Рис.1.

Из всего вышеизложенного следует, что затронутая проблема носит комплексный характер и для успешного разрешения ее необходимо проведение широкого круга исследований по самым различным направлениям. Представляется целесообразным выделить четырех следующих направления исследований:

1. Загрязнение верхней атмосферы парами воды и другими

примесями, влияющими на концентрацию электронов в ионосфере

– изучение различных механизмов доставки примесей в верхнюю атмосферу;

– выявление наиболее эффективных механизмов и оценка их влияния на ионосферу.

2. Возмущения ионосферы искусственными АВ и АГВ

– изучение источников АВ и АГВ;

– оценка влияния искусственных АВ и АГВ на ионосферу.

3. Возмущения ионосферы сильными электромагнитными полями радиопередатчиков, ЛЭП и электрифицированных железных дорог (ЭЖД)

– оценка интенсивности полей КВ радиостанций и их влияния на ионосферу;

– оценка эффективности переноса в верхнюю атмосферу электромагнитных полей ЛЭП и ЭЖД;

– исследование влияния на ионосферу электромагнитных полей СНЧ диапазона.

4. Сравнение состояния ионосферы над промышленными зонами Европы, Северной Америки и вне этих зон.

– анализ баз данных станций ВЗ ионосферы за несколько циклов солнечной активности с целью выявления характерных последствий антропогенных воздействий.

Такой подход на наш взгляд, позволит получить наиболее достоверные представления о естественной, условно естественной (т.е. неподверженной целенаправленному воздействию) и искусственно возмущенной ионосфере, необходимые при проведении фундаментальных и инженерных исследований в области физики ионосферы и ионосферного распространения радиоволн различных диапазонов.

Данная работа выполнена при поддержке Программы грантов Госкомвуза РФ – грант N 94-8.16-4053 и Российского Фонда Фундаментальных исследований – грант N 93-02-3360

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаев И.С., Демина В.Ф., Ильин Л.А. и др.. Ядерная энергетика. Человек и окружающая среда., Энергоиздат, 1981
2. Mandello M., Forbes M., JGR, 1978, 38A, p.151
3. Francois L., Gerard J., Plan.Space Sci., 198, 36, p.1391.
4. Альперович В.С., Бугмейстер Б.О. и др., ДАН СССР, 1983, 289, с.573
5. Митяков Н.А., Грач С.М., Митяков С.Н., Возмущение ионосферы мощными радиоволнами, ВИНИТИ, Итоги науки и техники, серия Геомагнетизм и высокие слои атмосферы, том 9, 1989
6. Бочкарев Г.С., Ким В.Ю. и др., Геом. и аэрон., 1979, 19, с.830
7. Бочкарев Г.С., Егоров И.Б. и др., Воздействие на ионосферное распространение мощных волн декаметрового диапазона при наклонном падении, прерпринт N 3, ИЗМИРАН, 1979
8. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А., Сейсмо-электромагнитные явления., Москва, Недра, 1978
9. Комарович В.Ф., Сосунов В.Н., Случайные радиопомехи и надежность КВ связи., Связь, 1977
10. Перебейнос К. Электромагнитная совместимость радио-электронных средств, Радио, N 10, с.22, 1979

12. Авдюшин С.И., Ветчинкин Н.В. и др., Космические исследования, 1993, т.31, вып.1, с.3
13. Козлов С.И., Романовский Ю.А. и др., Космические исследования, 1993, т.31, вып.1, с.26
14. Нагорский П.М., Тарашук Е.Ю., Известия ВУЗов, Физика, 1993, N 10, с.98
15. Ружин Ю.Я., Ораевский В.Н. и др. Комплексные исследования эффектов запусков ракет в субавроральной ионосфере, Препринт N 91(1038) ИЗМИР РАН, 1993
16. Крупеня Н.Д., Митякова Э.Е., Рахлин А.В. и др., О влиянии антропогенных процессов на ионосферу Земли. - Тезисы доклада, VIII Сопещание-семинар по проблеме "Неоднородная структура ионосферы", с.73, Н.Новгород-Абрау, 1991
17. Выборнов Ф.И., Митякова Э.Е., Рахлин А.В. Отклик ионосферы на возмущение мощной радиоволной, Препринт N 376, НИРФИ, Н.Новгород, 1993
18. Несторов Г., Панчева Д., Данилов А.Д., Геомагнетизм и аэрономия, 1991, т.31, N 6, с.1070
19. Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокуров В.А., Чернобровкаина Н.А., Явление F-spread рассеяния в ионосфере, М. 1984