

УДК 621 371.25

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ И РЕЛАКСАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

*В. А. Алебастров, Е. А. Бенедиктов, В. Н. Иванов, Ю. А. Игнатьев,
С. М. Савельев, А. С. Терехов*

В статье представлены результаты экспериментов по исследованию искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), возникающей при нагреве ионосферы, полученные с помощью метода панорамного приема сигналов обратного рассеяния при радиозондировании ИИТ в диапазоне дециметровых радиоволн. Оказывается, что пространственные масштабы ИИТ существенно зависят от условий ее возбуждения, и в случае, когда они оптимальны, достигают 240—320 км при мощности передатчика нагрева 150 кВт. Отмечается также существенная зависимость динамики развития и релаксации ИИТ от условий возбуждения.

В работе приводятся результаты экспериментов по исследованию искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), возникающей при вертикальном зондировании ионосферы мощным КВ-излучением, особенностью которых по сравнению с известными [1-3] являлось использование метода панорамного приема сигналов обратного рассеяния (СОР) в диапазоне дециметровых радиоволн. Это позволило получить данные о пространственной локализации ИИТ на различных стадиях ее развития.

Эксперименты проводились в августе—сентябре 1980 года в ночное время (20.00—4.00 мдв). Возмущение ионосферы осуществлялось с помощью передатчика мощностью порядка 150 кВт, излучавшего на одной из двух частот (4,6 МГц либо 5,75 МГц) радиоволну обыкновенной поляризации. Антенна передатчика имела КНД ≈ 100 .

Режим работы передатчика нагрева состоял из циклов: 5 минут — нагрев, 5 минут — пауза*. В районе расположения передатчика нагрева осуществлялось измерение параметров ионосферы с помощью вертикального зондирования ионосферы.

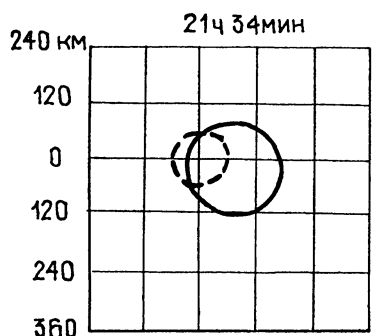
Диагностика ИИТ осуществлялась с помощью приемопередающего комплекса, расположенного на удалении 1300 км от ИИТ. Антенна передатчика была ориентирована на область ИИТ и имела ширину в азимутальной плоскости на уровне 3 дБ порядка 40—50°.

Приемное устройство комплекса позволяло проводить одновременный прием и регистрацию СОР с девяти антенн, имеющих различную ориентацию в азимутальной плоскости относительно направления на область возмущения (ОВ). Суммарный сектор обзора в азимутальной плоскости составлял примерно 50°. Кроме того, на приемном устройстве комплекса осуществлялся контроль за режимом работы передатчика нагрева, (временем включения и выключения) с помощью дополнительного приемника, настроенного на одну из его рабочих частот.

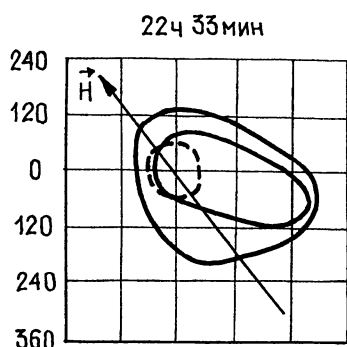
Методика измерений в эксперименте состояла из типичных временных циклов. В первом цикле осуществлялось измерение частотной зависимости интенсивности СОР. Измерения проводились спустя одну-

* В отдельных сеансах нагрева циклы нагрева и паузы составляли 10 мин.

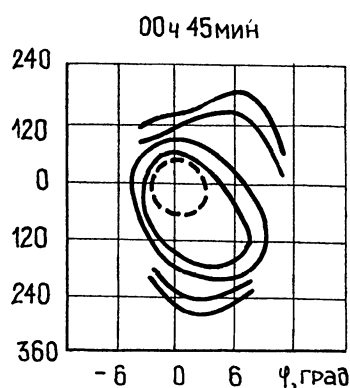
две минуты после начала цикла нагрева. На основании этих измерений определялась частота, на которой интенсивность СОР была максимальной (f_m). В следующем цикле нагрева проводились либо измерения СОР на фиксированной рабочей частоте f_m , либо повторялись измерения частотной зависимости СОР.



а)



б)



г)

Рис. 1.

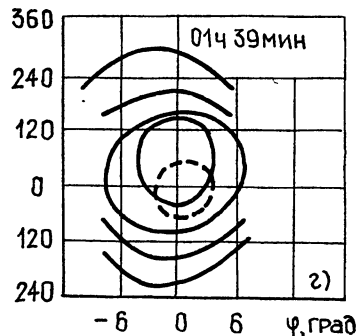
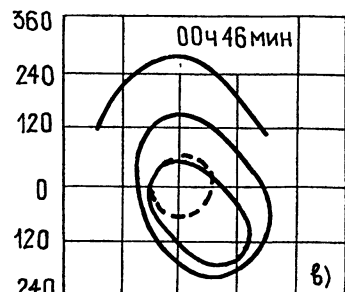
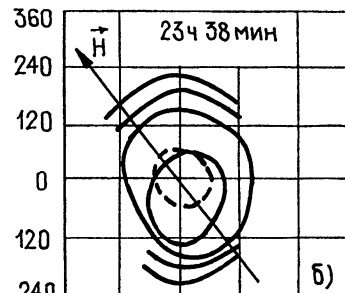
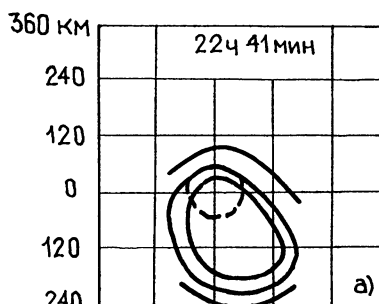


Рис. 2.

Данная методика проведения эксперимента позволяла, таким образом, в текущем времени выполнять измерения на частотах, для которых условия ракурсности выполнялись наилучшим образом.

На рис. 1, 2 приведены типичные панорамы СОР, наблюдавшиеся спустя две-три минуты после начала цикла нагрева. Измерения выполнены на оптимальной частоте при нагреве ионосферы на частотах 4, 6 и 5,75 МГц соответственно.

Панорамы с координатами дальность (ось ординат) — азимут (ось абсцисс) были получены следующим образом. Азимутально-дальностное распределение измеренных амплитуд СОР разбивалось последовательно на участки через 6 дБ от максимального значения амплитуды. Значения, попавшие в определенный интервал сечений, на рисунках обозначены изолиниями. Таким образом, на рисунке внутренняя изолиния соответствует относительным уровням сигналов от 0 до —6 дБ, следующая за ней — от —6 дБ до —12 дБ и т. д. Когда на различных азимутальных направлениях уровни сигналов были менее —12 дБ максимального сигнала, сравнение сигналов по уровням проводилось на фиксированной задержке, при этом считалось, что они формируются за счет боковых лепестков диаграммы направленности антенны. В этих случаях истинный уровень сигнала считался неопределенным и изолинии обрывались на соответствующих ему координатах дальность — азимут.

На рисунках нулевое значение азимутального угла соответствует направлению на передатчик нагрева. Пунктиром показан горизонтальный размер зоны, освещаемой антенной передатчика на высоте отражения мощной радиоволны. Ширина диаграммы направленности антенны (20°) бралась по уровню излучения мощности —3 дБ.

Как следует из рисунков, пространственные размеры импульса СОР существенно изменяются со временем. Максимальные масштабы СОР наблюдались в полночь. В центре области возмущения, ограниченной размером антенны передатчика нагрева, независимо от времени наблюдений, распределение интенсивности СОР ориентировано по направлению геомагнитного поля H .

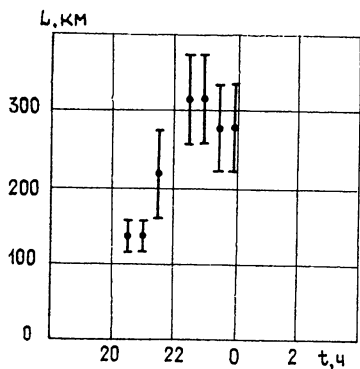


Рис. 3.

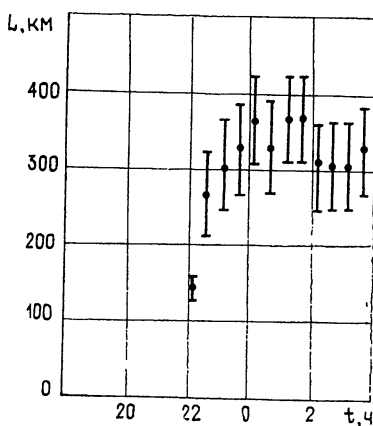


Рис. 4.

Согласно [5] при ракурсном рассеянии радиоволн длительность импульсов для оценки масштабов возмущения ограничена. По подсчетам для данных условий эксперимента она не должна превышать 0,1—0,2 мс. Поскольку длительность зондирующего импульса составляла 0,8 мс, то для оценки размеров области возмущения использовались измерения интенсивности СОР на различных азимутальных направлениях. При этом предполагалось, что сектор углов в азимутальной плоскости, в которой перепад уровня СОР относительно макси-

мального превышал относительный уровень боковых лепестков диаграммы направленности приемника, соответствует угловым размерам области возмущения*.

В этом случае горизонтальный масштаб ОВ в азимутальной плоскости можно оценить из соотношения $L \simeq 2\sqrt{D^2 + z^2} \operatorname{tg} \Delta\varphi/2$, где D — расстояние между передатчиком пробных волн и стендом нагрева, z — высота отражения мощной радиоволны, $\Delta\varphi$ — ширина амплитудно-азимутальной зависимости СОР по уровню -12 дБ. На рис. 3, 4 приведена динамика во времени горизонтального размера области возмущения (L) при рабочих частотах передатчика нагрева 4,6 МГц и 5,75 МГц соответственно. Для этого использовались экспериментальные данные, полученные спустя две-три минуты после начала цикла нагрева.

Согласно рисункам, в момент времени, соответствующий началу регистрации СОР от ИИТ, размеры области возмущения равны 80—140 км. Максимальные размеры области возмущения наблюдались в полночь ($L \sim 240 \div 360$ км). Причиной столь существенной вариации пространственных размеров возмущения может являться, по-видимому, изменение условий возбуждения ИИТ.

В первом приближении [2] пространственный масштаб возмущения ограничен угловым сектором антенны передатчика нагрева, для которого мощность радиоизлучения на уровне отражения превышает пороговую.

При высоте отражения волн накачки порядка 200—300 км эффективный угловой сектор антенны передатчика нагрева, участвующий в возбуждении ИИТ, должен составлять $\sim 40^\circ$. Уровень излучаемой мощности на краях такого углового сектора при максимальной мощности передатчика нагрева, равной 150 кВт, составляет 15—20 кВт. Это согласуется с экспериментально измеренным значением порога возбуждения ИИТ (20—30 кВт), приведенным в работах [2, 3].

Экспериментальные данные, иллюстрирующие наиболее общие закономерности динамики ОВ при включении и выключении передатчика нагрева, приведены на рис. 5, 6. Измерения выполнены на частоте 20 МГц. Время некогерентного усреднения — 20 с. Как и ранее, пунктиром указаны горизонтальные размеры области ионосферы, освещаемые антенной передатчика на высоте отражения радиоволны нагрева. В первую минуту нагрева пространственный масштаб СОР соответствует сечению антенны передатчика нагрева. Распределение интенсивности СОР ориентировано вдоль направления геомагнитного поля (на рисунке направление H указано стрелкой). Спустя одну-две минуты после начала нагрева пространственный масштаб СОР стабилизируется. Характер поведения интенсивности СОР на удалении от центра нагрева обусловлен регулярным ионосферным дрейфом. Через одну минуту после выключения передатчика нагрева (рис. 6е) координаты регистрируемого СОР соответствуют области, ограниченной антенной передатчика нагрева.

Более детальное исследование особенностей развития и релаксации ИИТ проводилось на основе анализа формы импульса СОР при приеме рассеянного сигнала на антенну, ориентированную в азимутальном направлении на область возмущения.

Анализ экспериментальных данных показал, что характерные времена развития и релаксации ИИТ существенно зависят от времени наблюдения. Так, в период 21.00—22.00 мдв, соответствующему началу регистрации СОР, при нагреве на $f_n = 4,6$ МГц рассеянный сигнал появлялся спустя 1—5 с после включения передатчика нагрева. Далее,

* В нашем случае у используемых антенн уровень боковых лепестков диаграммы направленности был не выше -12 дБ.

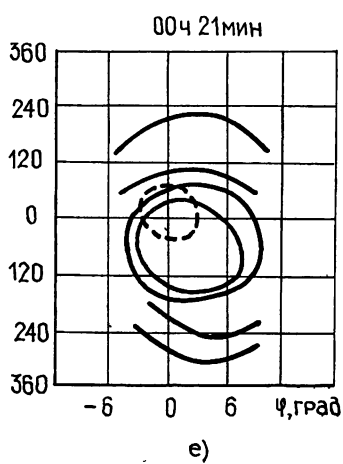
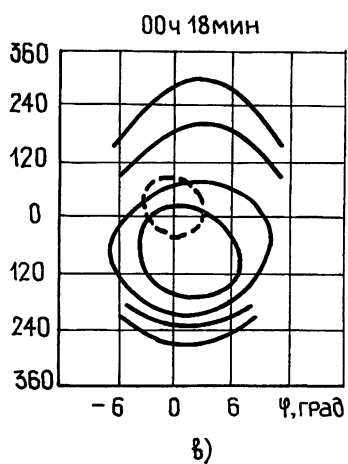
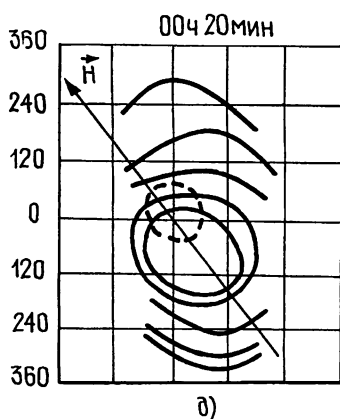
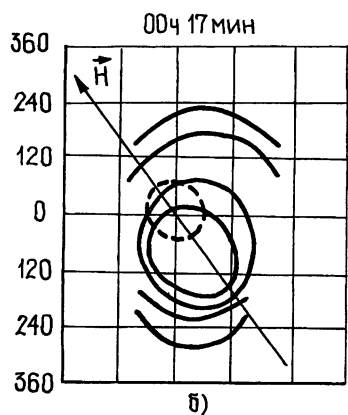
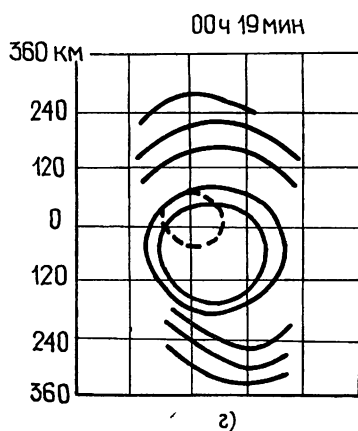
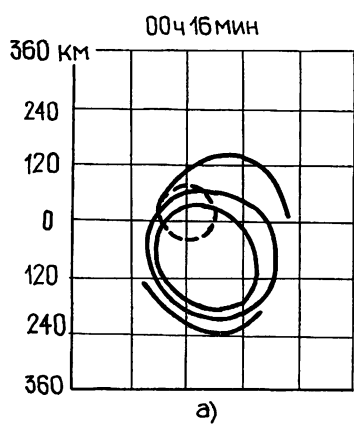


Рис. 5.

в течение всего периода нагрева форма и длительность импульса СОР оставались практически неизменными. Таким образом, можно предполагать, что пространственные размеры области возмущения в данных условиях формируются в течение 1—5 с. Время развития максимальной интенсивности СОР было равно в среднем 20—30 с, а время релаксации — 30—40 с.

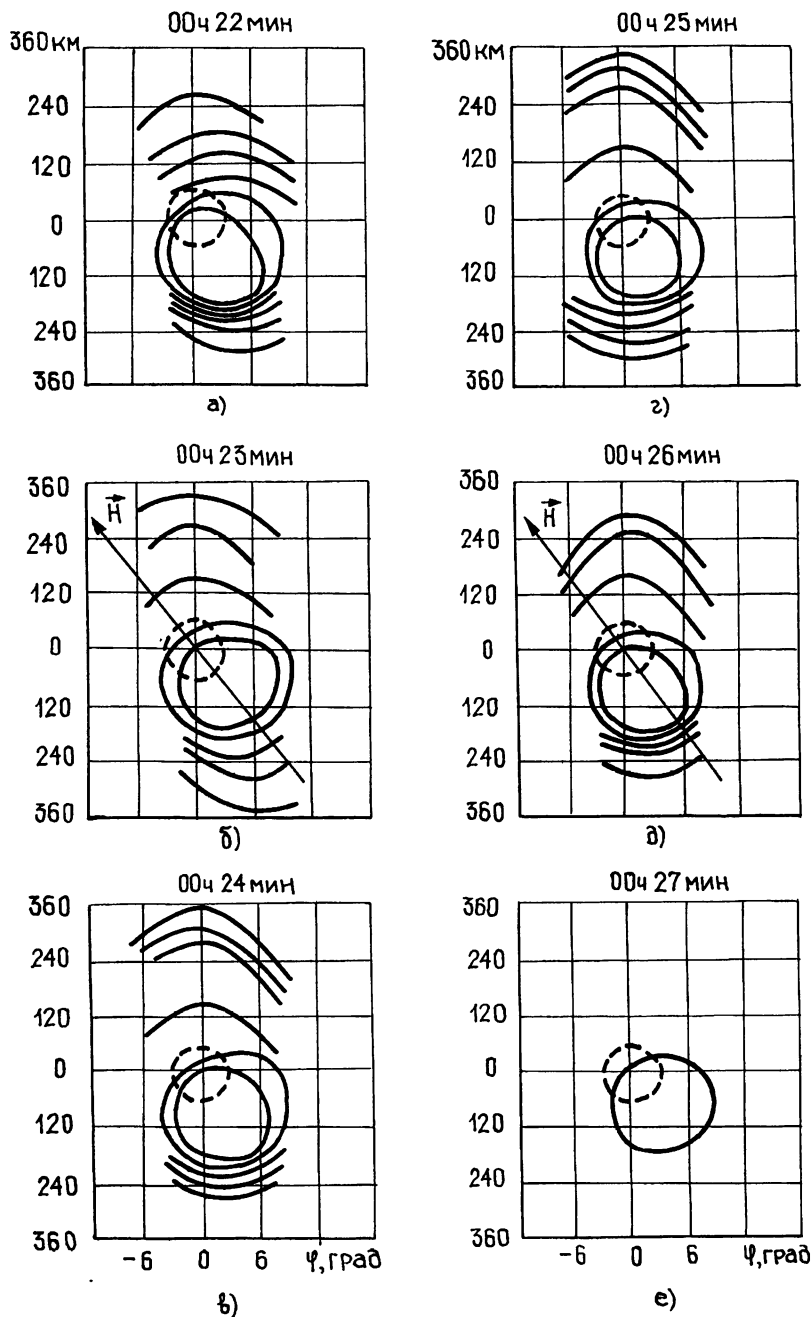


Рис. 6.

Более сложная динамика ИИТ наблюдалась в 0.00—3.00 мдв. Здесь форма и длительность импульса СОР изменялись в течение 10—15 с с момента начала цикла нагрева, т. е. пространственные мас-

штабы возмущения формировались уже в течение первых 10—15 с. В динамике развития интенсивности СОР наблюдалось два характерных временных интервала: первый — длительностью не более 20—30 с, в течение которого интенсивность СОР резко возрастала, и второй — длительностью 2—4 мин, когда интенсивность сигнала достигала квазистационарного уровня.

Время релаксации СОР составляет в среднем 2—3 мин. При этом максимальная интенсивность СОР в течение 30—40 с после выключения передатчика нагрева уменьшалась на 10—15 дБ. Далее скорость уменьшения уровня СОР падает.

Как известно [2, 4], наблюдавшиеся характерные времена быстрой релаксации уровня СОР (30—40 с) указывают на диффузионный характер релаксации искусственных неоднородностей.

Вместе с тем, как и в ранее проведенных экспериментах [4], в отдельные сеансы наблюдались аномально большие времена релаксации ИИТ, составляющие 3—5 мин. Согласно результатам наших экспериментов, наиболее часто такие времена наблюдались в 24.00—2.00 мдв, т. е. в оптимальных условиях возбуждения ИИТ. Следует также заметить, что в этот период времени, спустя 40—60 с после выключения передатчика нагрева, достаточно регулярно регистрировались СОР с двумя локальными максимумами интенсивности, что связано, по-видимому, с наличием двух рассеивающих центров области возмущения.

Таким образом, результаты эксперимента указывают на существенную роль условий возбуждения искусственной ионосферной турбулентности в формировании пространственных масштабов возмущения и динамических характеристик ИИТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беленов А. Ф. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с 1805
2. Ерухимов Л. М., Метелев С. А., Митяков Н. А., Фролов В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 12, с. 1738.
3. Коровин А. В., Метелев С. А. и др. Нелинейные явления в ионосфере — Мурманск, 1979.
4. Ерухимов Л. М., Метелев С. А. и др. — В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 7.
5. Minkoff J. — Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 997.

Поступила в редакцию
28 февраля 1983 г.

THE CHARACTERISTICS OF THE DEVELOPMENT AND RELAXATION OF THE ARTIFICIAL IONOSPHERIC TURBULENCE. EXPERIMENTAL RESULTS

*V. A. Alebastrov, E. A. Benediktov, V. N. Ivanov,
Yu. A. Ignat'ev, S. M. Savel'ev, A. S. Terekhov*

The experimental results of the artificial ionospheric turbulence (AIT) research are presented. The method of the panorama reception of the backscattered signals was applied when radio sounding of the AIT in the decametric wave range was taken place. It was shown that space dimensions of the AIT depended greatly on the excitation conditions and in the optimum they were 240—320 km, the heating transmitter power was 150 kW. The essential dependence of dynamics and relaxation of AIT on the excitation conditions is noted.