

УДК 551.550.536

О ФОРМИРОВАНИИ ИСКУССТВЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

*Н. В. Бахметьева¹, В. Л. Фролов¹, В. Д. Вяхирев¹, Е. Е. Калинина¹,
И. А. Болотин¹, А. Д. Акчурина², Е. Ю. Зыков²*

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород;

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Приведены результаты экспериментов по зондированию возмущённой области ионосферы, созданной мощным радиоизлучением нагревного стенда «Сура», одновременно в двух наблюдательных пунктах. Один из них расположен на территории нагревного стенда, второй — в 170 км к востоку от него в обсерватории Казанского госуниверситета (пункт «Обсерватория»). Целью экспериментов было исследование механизма возникновения искусственных возмущений в нижней ионосфере при отражении мощной волны в области F , определение характеристик сигналов обратного рассеяния на искусственных неоднородностях электронной концентрации, возникающих при возмущении ионосферы. Воздействие на ионосферу проводилось сеансами в течение нескольких секунд или нескольких минут мощной радиоволной обыкновенной поляризации, излучаемой передатчиками стенда «Сура». Зондирование возмущённой области осуществлялось методом вертикального зондирования в лаборатории «Васильсурск» с помощью установки частичных отражений на частоте 2,95 МГц и с помощью модифицированной ионосферной станции «Циклон» на десяти частотах от 2 до 6,5 МГц в пункте «Обсерватория». Одновременно снимались ионограммы вертикального зондирования в обычном режиме. В приёмных пунктах зарегистрированы одновременные изменения амплитуд сигналов вертикального зондирования и появление сигналов обратного ракурсного рассеяния, коррелировавшие с периодом включения нагревного стенда. Обсуждаются их характеристики и динамика.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы вновь усилился интерес к экспериментальным исследованиям вопросов, связанных с образованием искусственных возмущений в ионосфере — их диагностикой, исследованием структуры и динамики возмущённой области, определением параметров искусственных неоднородностей различных пространственных масштабов, возникающих в этой области. Этот интерес во многом обусловлен тем, что стали широко применяться методы зондирования сигналом с линейной частотной модуляцией, использоваться ионозонды/радиопеленгаторы, также разрабатываются новые доплеровские методики, связанные, в частности, с фазовыми измерениями, применяется цифровая регистрация сигналов и современные методы обработки.

В последние годы опубликован ряд работ, в которых приведены результаты экспериментов по наблюдению влияния возмущений, создаваемых излучением наземных нагревных стендов на характеристики сигналов наклонного и вертикального зондирования на трассах различной ориентации и протяжённости [1–10]. Результаты последних исследований в этом направлении докладывались на XIII Всероссийской конференции в Йошкар-Оле в мае 2011 года. Обсуждалась, в частности, облачная («пэтчевая») структура области с искусственными неоднородностями, которая создаётся нагревом ионосферы мощными радиоволнами и способна эффективно рассеивать радиоволны в широком диапазоне частот [3, 10].

В экспериментах авторов настоящей статьи [2, 6, 7] для выяснения особенностей распространения возмущения ионосферы с высоты отражения мощной волны на другие высоты были использованы разные режимы воздействия на ионосферу излучением стенда «Сура». Эксперименты, результаты которых приведены в данной работе, являются логическим продолжением [2, 6, 7]

и развитием на новой экспериментальной базе выполненных в 1985–1990 годах экспериментов по исследованию искусственной области возмущения методом регистрации сигналов обратного рассеяния при её зондировании пробными радиоволнами из пункта, отстоявшего от нагревного стенда «Сура» на 110 км к западу на широтной трассе в лаборатории НИРФИ «Зимёнки» [11–15].

Задачей экспериментов, результаты которых приведены ниже, было исследование механизма возникновения искусственных возмущений в нижней ионосфере при отражении мощной волны в области F и определение характеристик обратного рассеяния сигналов на искусственных неоднородностях электронной концентрации, появляющихся при возмущении ионосферы.

1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1.1. Режимы воздействия на ионосферу

Эксперименты проводились в 2011 году 19 июня с 07:00 до 10:00 и 13–15 сентября в утренние (08:00–12:00) и вечерние (14:00–21:00) часы (здесь и далее указывается московское летнее время, которое опережает всемирное время на 4 часа). Возмущение ионосферы осуществлялось передатчиками нагревного стенда «Сура» (лаборатория «Васильсурск», $56,1^\circ$ с. ш.; $46,1^\circ$ в. д.). В июне радиоволны обыкновенной поляризации излучались в зенит на частоте 4,7 МГц. В сентябре воздействие на ионосферу проводилось по следующему расписанию: 13 сентября с 16:00 до 20:00 и 14 сентября с 08:00 до 12:00 — нагрев на частоте 4,7 МГц радиоволнами обыкновенной поляризации, 14 сентября с 16:00 до 20:00 и 15 сентября с 08:00 до 12:00 — нагрев на частоте 5,6 МГц радиоволнами необыкновенной поляризации. Эффективная мощность излучения составляла порядка 80 МВт в июне и 50 МВт в сентябре 2011 года.

Основной нагрев ионосферы проводился в режиме (+5 мин, –10 мин), т. е. в течение 5 мин передатчики стенда синфазно излучали мощные радиоволны, а в следующие 10 мин была пауза в работе стенда. Однако через 5 мин «чистой» паузы нагревный стенд включался через каждые 25 с и работал в течение 5 с, так что во время второй пятиминутки паузы проводилось 10 коротких нагревов. Использование разных временных режимов позволяло исследовать область искусственного возмущения ионосферы при вертикальном и наклонном зондировании как на длинных (минуты), так и на сравнительно коротких (секунды) временах. Антенна нагревного стенда в этих экспериментах была направлена в зенит.

Кроме того, 18 июня с 12:00 до 13:00 и 19 июня с 22:00 до 23:30 были проведены часовые сеансы нагрева в режиме (+10 мин, –5 мин) на частотах 5,828 и 6,500 МГц соответственно с амплитудной модуляцией от 2 до 18,87 Гц. В этих сеансах нагрева максимум диаграммы направленности стенда «Сура» был наклонён на 16° к югу.

1.2. Характеристики диагностических комплексов

Диагностика возмущённой области проводилось её зондированием пробными радиоволнами в двух приёмных пунктах. Приёмопередающий диагностический комплекс на базе установки частичных отражений располагался в одном географическом пункте с нагревным стендом «Сура» на расстоянии 1 км от него. Для излучения пробных радиоволн и приёма ионосферных сигналов использовалась установка частичных отражений на частоте 2,95 или 4,7 МГц. Диагностический передатчик излучал линейно поляризованный импульсный сигнал с длительностью 30 мкс и частотой повторения 25 или 50 Гц. При приёме выделялись сигналы обеих линейных поляризаций, в цифровом виде регистрировались их квадратурные компоненты с шагом по высоте 1,4 км, по которым определялись амплитуда и фаза пробной радиоволны на соответствующей высоте [16].

Для наклонного зондирования возмущённой излучением стенда области ионосферы одновременно с установкой частичных отражений использовался модифицированный цифровой ионозонд «Циклон», находящийся в обсерватории Казанского (Приволжского) федерального университета ($55,85^\circ$ с. ш.; $48,8^\circ$ в. д.). Трасса «Сура»—«Обсерватория» является трассой почти широтного направления и расположена в плоскости, почти перпендикулярной плоскости магнитного меридиана, проходящего через стенд «Сура»¹. Ионозонд «Циклон» работал в импульсном режиме излучения на 10 частотах приблизительно с 2,01 до 6,51 МГц с шагом по частоте 500 кГц с частотой повторения 50 Гц. Система наклонного зондирования на основе ионозонда «Циклон» подробно описана в [4, 5, 17]. В обязательном порядке один из каналов отводился для приёма сигнала на частоте работы стенда «Сура». Периодически ионозонд переключался в обычный режим съёма ионограмм.

1.3. Состояние ионосферы в период экспериментов

В любом ионосферном эксперименте, тем более в эксперименте, связанном с воздействием на ионосферу, чрезвычайно важно учитывать состояние ионосферы. Для контроля ионосферной обстановки в июне 2011 года в пункте «Васильсурск» каждые 5÷10 минут с помощью ионозонда «Базис» снимались ионограммы вертикального зондирования, по которым восстанавливался высотный профиль электронной концентрации и определялись истинные высоты отражения пробной и нагревной радиоволн [18]. В сентябре 2011 года состояние ионосферы в реальном времени оценивалось по данным ионозонда «Циклон» (пункт «Обсерватория», г. Казань) и ионозондов «Парус» и DPS-4 Центра мониторинга ионосферы (ИЗМИРАН, г. Троицк), доступным в сети Интернет [19, 20].

1.3.1. Ионосферная обстановка над стендом «Сура» 19 июня 2011 года

По данным ионозонда «Базис» часы наблюдений с 07:00 до 10:00 характеризовались относительно спокойным состоянием ионосферы с ростом критических частот слоя E от 2,4 до 3,2 МГц, слоя F_1 — от 3,9 до 4,5 МГц и слоя F_2 — от 5,9 до 6,1 МГц. Начиная с 07:30 на ионограммах на действующих высотах 100÷108 км появились отражения от полупрозрачного спорадического слоя E (E_s), предельная частота отражения которого со временем изменялась в пределах 3,25÷4,1 МГц. Иногда на ионограмме в слое E_s было отчётливо выражено магнитоионное расщепление компонент. По восстановленному согласно методике [18] профилю электронной концентрации определялись истинные высоты отражения нагревной и пробной радиоволн. В результате получено, что нагревная волна обыкновенной поляризации с частотой 4,7 МГц отражалась на высоте 190÷210 км. Высоты отражения пробных радиоволн с частотой 2,95 МГц существенно зависели от поляризации. Обыкновенная компонента отражалась на высотах 125÷130 км приблизительно до 07:30, в дальнейшем высота её отражения снизилась до 100÷110 км. Необыкновенная компонента пробной волны отражалась на высотах 90÷100 км. Кроме того, обе магнитоионные компоненты пробной волны частично отражались полупрозрачным спорадическим слоем E .

1.3.2. Ионосферная обстановка в пункте «Обсерватория» 19 июня 2011 года

По данным ионозонда «Циклон» ионосферная ситуация соответствовала зарегистрированной ионозондом «Базис». Критические частоты ионосферных слоёв изменялись в небольших преде-

¹ Отметим, что удачное расположение нагревного стенда «Сура» и диагностического пункта «Обсерватория» на трассе почти широтной ориентации способствовало развитию в последние годы интенсивных исследований сигналов обратного рассеяния разными научными коллективами (см. статьи в настоящем выпуске журнала).

лах: от 2,7 до 3,2 МГц в области E , от 3,9 до 4,5 МГц в области F_1 и от 5,8 до 6,1 МГц в области F_2 . Таким образом, в наблюдениях 19 июня 2011 года ионосферные условия в обоих приёмных пунктах были практически идентичны. Самые нижние частоты из сетки частот при работе ионозонда «Циклон» в режиме наклонного зондирования почти полностью экранировались спорадическим слоем E с предельной частотой отражения $3,3 \div 3,4$ МГц.

1.3.3. Ионосферная обстановка 13–15 сентября 2011 года

В сентябре станция «Базис» в наблюдательном пункте «Васильсурск» по техническим причинам не работала, и для анализа ионосферной обстановки в реальном времени использовались ионограммы, снимавшиеся каждые 15 минут и размещаемые в свободном доступе на сетевых ресурсах ИЗМИРАН. Для анализа результатов экспериментов использовались также ионограммы, полученные ионозондом «Циклон». Сравнение данных ионозондов ИЗМИРАН и Казанского университета показало почти полную идентичность ионограмм, из чего можно заключить, что в районе лаборатории «Васильсурск» ионосферная ситуация была аналогичной.

По данным этих ионозондов 13 сентября с 16:00 до 20:00 критические частоты слоя F_2 изменялись от 5,2 до 5,5 МГц, но в интервале с 17:30 до 19:00 уменьшались до 5,3 МГц. Разность критической частоты слоя и рабочей частоты нагревного стенда составила $\Delta f = 0,5 \div 0,8$ МГц. Критические частоты слоя F_1 увеличились с 2,9 до $4,1 \div 4,3$ МГц в 17:30, затем они явно не определялись, хотя слой просуществовал до 19:00. Критические частоты слоя E постепенно уменьшались с 3,1 до 1,7 МГц. Полупрозрачный спорадический слой E с предельной частотой отражения $2,3 \div 3,2$ МГц отмечался на ионограммах с 16:30.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Результаты наклонного зондирования возмущённой области из пункта «Обсерватория»

При воздействии на F -область ионосферы мощным радиоизлучением стенда «Сура» через несколько секунд после начала работы стенда ионозонд «Циклон» начинал регистрировать сигналы, коррелировавшие с периодом излучения мощной волны, на действующих дальностях (задержках, временах группового запаздывания), соответствовавших сигналам обратного рассеяния от возмущённой области ионосферы. В июне 2011 года эти сигналы были зарегистрированы эпизодически и только на частотах 4,02; 4,70 и 6,52 МГц. На последней из частот в разных ионосферных условиях групповое запаздывание (задержка) составляло от 1 250 до 1 400 мкс, что соответствует действующим дальностям 375–420 км. Интервал действующих высот (дальностей) наблюдения рассеянного сигнала составлял около 50 км.

На рис. 1а, б в яркостном виде приведены примеры регистрации рассеянного сигнала на частотах 4,70 и 6,52 МГц соответственно. На рис. 1в приведена зависимость от времени амплитуды рассеянного сигнала на частоте 6,52 МГц (пунктирная линия 2) и нагревной волны на частоте 4,70 МГц (сплошная линия 1). На рис. 1а, б видны как сигналы вертикального зондирования от регулярной (естественной) ионосферы с магнитоионным расщеплением компонент (задержки $900 \div 1\,200$ мкс), так и слабые (по сравнению с зеркально отражённым сигналом) обратнорассеянные сигналы. На частоте 4,70 МГц мощный сигнал от стенда «Сура» перегружал входные каскады ионозонда «Циклон», что на яркостной записи рис. 1а выглядит как столбики равной интенсивности. На этом фоне рассеянный сигнал, появлявшийся во время нагрева, естественно, не виден, но заметна его релаксация по окончании нагрева на задержках $1\,250 \div 1\,300$ мкс.

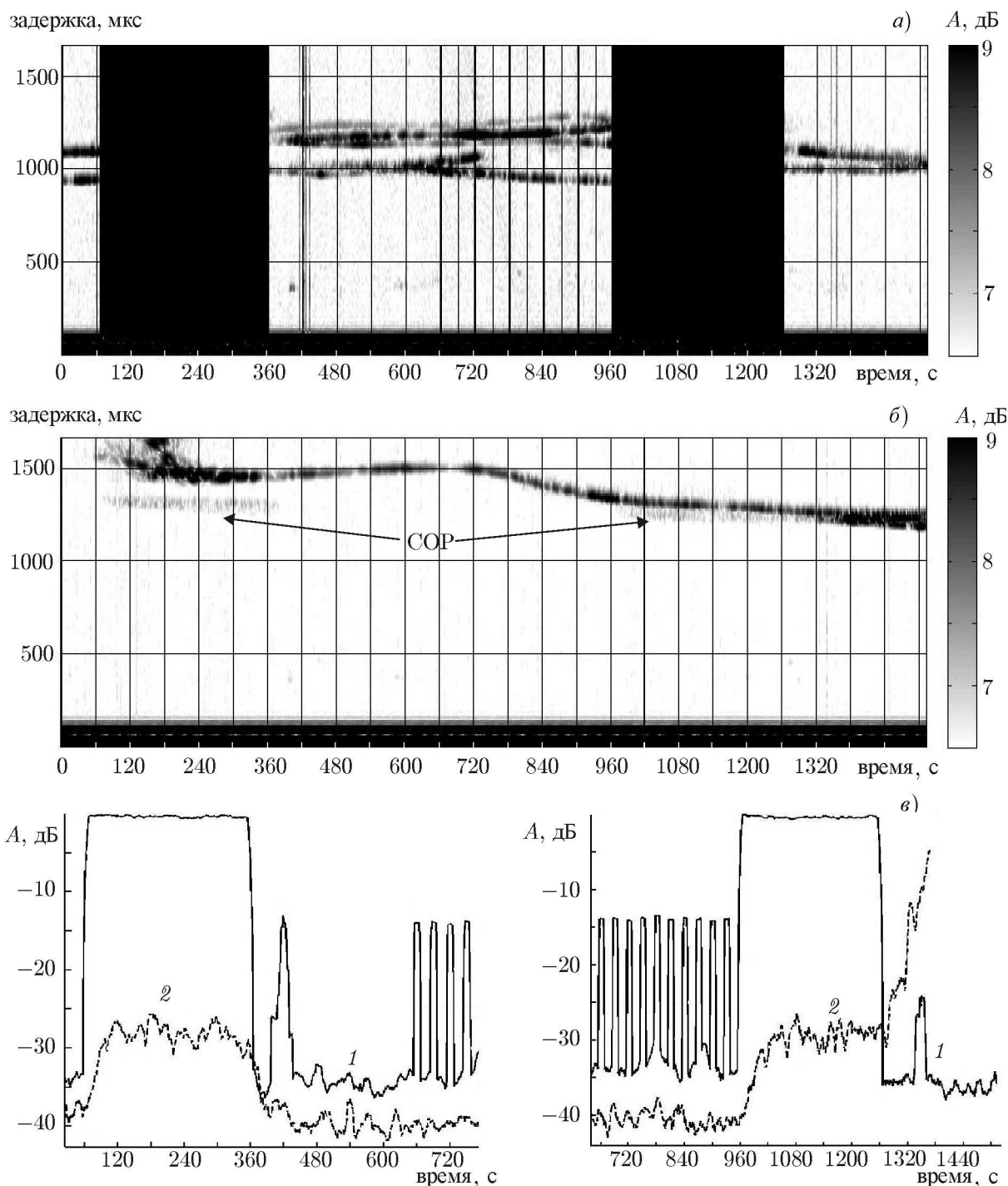


Рис. 1. Пример регистрации в яркостном виде ионозондом «Циклон» сигналов вертикального зондирования на частоте 4,70 МГц (а) и сигналов обратного рассеяния (COP) на частоте 6,52 МГц при нагреве ионосферы (б). (в) Зависимость амплитуд сигналов от времени в сеансе 06:59 MSK 19 июня 1991 года. Сплошная линия 1 соответствует сигналам на частоте 4,70 МГц, пунктирная линия 2 — 6,52 МГц

Узкими столбиками во вторую пятиминутку паузы показаны короткие пятисекундные интервалы нагрева. На рис. 1б на частоте 6,52 МГц виден рассеянный сигнал, который по задержке располагался ниже зеркального сигнала на $100 \div 150$ мкс. В течение следующих 10 мин область

зеркального отражения начала снижаться (росли критические частоты ионосферы) и «наполнять» на область рассеяния. Это в полной мере отражено на временной зависимости амплитуды на рис. 1в для первого и второго сеансов нагрева. Столбики соответствуют интервалам работы нагревного стенда. При нагреве ионосферы короткими интервалами с длительностью 5 с изменений амплитуды сигнала по отношению к фоновым значениям 11 июня 2011 года не зарегистрировано.

В сентябре 2011 года рассеянные сигналы принимались в вечерние часы 13 сентября в течение всего времени наблюдений на разных частотах пробных радиоволн и 14 сентября эпизодически с 09:00 до 10:00 на частоте 6,11 МГц при нагреве ионосферы в течение 5 минут волной обыкновенной поляризации с частотой 4,70 МГц. При воздействии на ионосферу мощной радиоволной необыкновенной поляризации с частотой 5,6 МГц как в вечерние часы 14 сентября, так и в утренние часы 15 сентября рассеянные сигналы не были зарегистрированы.

Остановимся более подробно на результатах измерений 13 сентября. Во время каждого сеанса ионозондом «Циклон» регистрировались рассеянные сигналы от возмущённой области ионосферы, создаваемой мощным радиоизлучением стенда «Сура», практически на всех частотах пробных радиоволн от 2,01 до 6,51 МГц в обеих поляризациях. Рассеянные сигналы с определённой высоты появлялись через $5 \div 30$ с после начала нагрева и в течение $5 \div 10$ с достигали некоторого установившегося значения. По окончании сеанса нагрева рассеянные сигналы пропадали, время их релаксации составило от $5 \div 10$ до 50 с.

На рис. 2 для примера приведены характерные яркостные записи амплитуд сигналов в сеансе 18:48 MSK 13 сентября 2011 года для частот 2,51; 4,10; 4,70 и 5,51 МГц, а также ионограмма вертикального зондирования в пункте «Обсерватория», снятая во время этого же сеанса измерений. Записи для частот 3,11 и 3,51 МГц не приведены, т. к. они мало отличаются от записи на нижней частоте 2,51 МГц. На частотах, на которых запись не слишком зашумлена помехой, отчётливо видны рассеянные сигналы во время нагрева (здесь интервал нагрева показан не полностью) и их постепенная релаксация после его окончания. К вечеру после 19:00 релаксация в целом становилась продолжительнее. Интервал групповых задержек (по ним рассчитываются действующие дальности, соответствующие принимаемым сигналам) составил $1\,000 \div 1\,400$ мкс.

Например, в сеансе 18:48 MSK рассеянные сигналы на частотах $2 \div 4$ МГц появлялись в интервале задержек $1\,000 \div 1\,100$ мкс, что хорошо видно также на ионограмме, приведённой на рис. 2д. На частоте 5,51 МГц рассеянный сигнал появился в обеих поляризациях пробной радиоволны: необыкновенная компонента рассеянного сигнала примыкала по действующей дальности (задержке, равной $1\,100 \div 1\,150$ мкс) к зеркальному сигналу той же поляризации, а сигнал обратного рассеяния обыкновенной поляризации имел сильно диффузный характер и занимал интервал задержек $1\,200 \div 1\,800$ мкс. Без нагрева на этой частоте зеркальное отражение обыкновенной компоненты пробной волны практически отсутствовало, т. к. частота 5,51 МГц превышала критическую частоту F -области.

В нескольких сеансах на частоте 5,51 МГц зарегистрированы слабые рассеянные сигналы необыкновенной поляризации при коротких пятисекундных нагревах (см. рис. 2г), которые достигали максимума к концу нагрева или через $5 \div 10$ с после него и релаксировали, исчезая полностью, приблизительно через $15 \div 20$ секунд после окончания, как правило, до начала следующего нагрева. Истинная высота рассеяния пробного сигнала на самой низкой частоте 2,01 МГц, на которой принимался обратно рассеянный сигнал, согласно расчётам лучевых траекторий, проведённым для данной трассы с учётом магнитного поля [21, 22], не превышала $100 \div 120$ км в вечернее время. Так что разность истинных высот рассеяния нагревной и пробной радиоволн для данной частоты составила 100 км. Рассеянные сигналы с более высокими частотами $4 \div 6$ МГц приходили с высот до 40 км ниже высоты отражения мощной волны. Это соответствует эффективной скорости распространения возмущения вниз порядка 3 км/с.

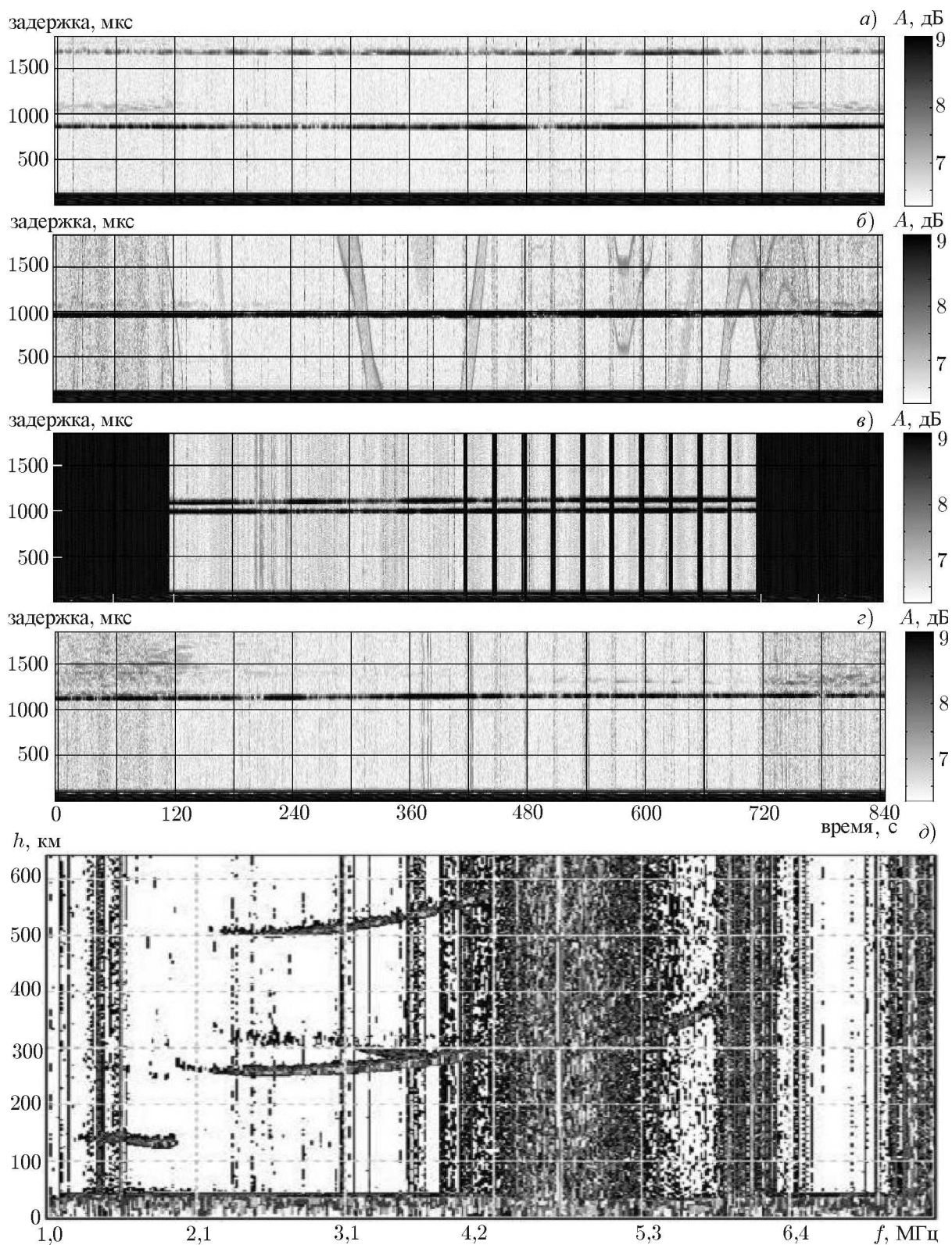


Рис. 2. Пример регистрации в яркостном виде ионозондом «Циклон» сигналов вертикального зондирования и обратного рассеяния на частотах $f = 2,51$ МГц (а), $f = 4,11$ МГц (б), $f = 4,70$ МГц (в) и $f = 5,51$ МГц (г) и на ионограмме вертикального зондирования (д) в сеансе 18:48:00 MSK 13 сентября 2011 года

Таким образом, по результатам многочастотного наклонного зондирования возмущённой области ионосферы из наблюдательного пункта, расположенного в 170 км от нагревного стенда на почти широтной радиотрассе, можно сделать следующий вывод. Во время нагрева при сочетании определённых ионосферных условий, частот и поляризаций пробных и нагревной радиоволн могут стабильно появляться сигналы обратного рассеяния от искусственных неоднородностей ионосферной плазмы, вытянутых вдоль геомагнитного поля. Поперечные размеры этих неоднородностей $l_{\perp} = \lambda/(2n)$ определяются брэгговским условием обратного рассеяния, где n — показатель преломления радиоволны в плазме, и в условиях эксперимента для $\lambda = 50 \div 150$ м и $n \approx 0,4 \div 0,5$ (получено из расчёта высотного профиля электронной концентрации $N(z)$) составляют порядка $60 \div 190$ м.

2.2. Результаты вертикального зондирования возмущённой области в приёмном пункте «Васильсурск»

При пятиминутном нагреве в эксперименте 19 июня 2011 года события развивались подобно тем, что наблюдались в экспериментах 2009–2010 годов. Они подробно обсуждались в работах [6, 7]. Яркостная запись амплитуд сигналов в координатах «действующая высота—время» при вертикальном зондировании возмущённой области ионосферы на частоте пробной волны 2,95 МГц, включающая три пятиминутных сеанса нагрева и короткие пятисекундные нагревы (показаны на верхней шкале), приведена на рис. 3а. После начала нагрева в большом диапазоне действующих высот, отличающихся от высоты зеркального отражения пробной волны обыкновенной поляризации на $200 \div 400$ км, появлялся сигнал, который был назван в [2] дополнительным, а не рассеянным, т. к. природа его не была ясна. Отметим, что, в отличие от экспериментов 2009–2010 годов во время коротких пятисекундных нагревов дополнительные сигналы были очень слабо выражены.

Как показано ранее в разделе 1.3, обыкновенная компонента пробной волны отражалась в нижней части слоя F_1 и верхней части слоя E , необыкновенная — на высоте ниже 100 км. По мере того, как росла критическая частота E -области, пробные волны обеих поляризаций стали отражаться от слоя E . При этом действующие высоты, на которых наблюдался дополнительный сигнал, уменьшились до $150 \div 200$ км. На рис. 3а видно, как около 07:30 с подъёмом Солнца над горизонтом произошла перестройка в нижней ионосфере и критическая частота E -области увеличилась. В результате обе поляризации пробной волны стали отражаться в E -области — обыкновенная волна вблизи её максимума на истинной высоте $z \approx 110$ км, необыкновенная — несколько ниже, на высоте $z \approx 90$ км.

На рис. 3а хорошо видно также появление нового отражения в первых двух сеансах нагрева на высотах ниже высоты зеркального отражения сигнала обыкновенной поляризации. Этот «подслойный» дополнительный сигнал заметно отделён от зеркально отражённой компоненты, и его интенсивность растёт к концу нагрева. Кроме того, на действующей высоте $h = 150$ км (что соответствует истинной высоте $z = 120$ км) этот сигнал появился через $20 \div 25$ с после начала нагрева, а релаксировал через $45 \div 50$ с. На рис. 3б для шести действующих высот приведены зависимости от времени амплитуды «подслойного» дополнительного сигнала, из которых хорошо видна динамика его развития.

Отметим, что дополнительные сигналы не наблюдались при работе нагревного стенда на частотах 5,828 и 6,500 МГц в режиме амплитудной модуляции сигналом с частотами 2,00 до 18,87 Гц соответственно.

Обратимся далее к результатам эксперимента в сентябре 2011 года.

В начале измерений в вечерние часы 13 сентября при нагреве ионосферы появлялся допол-

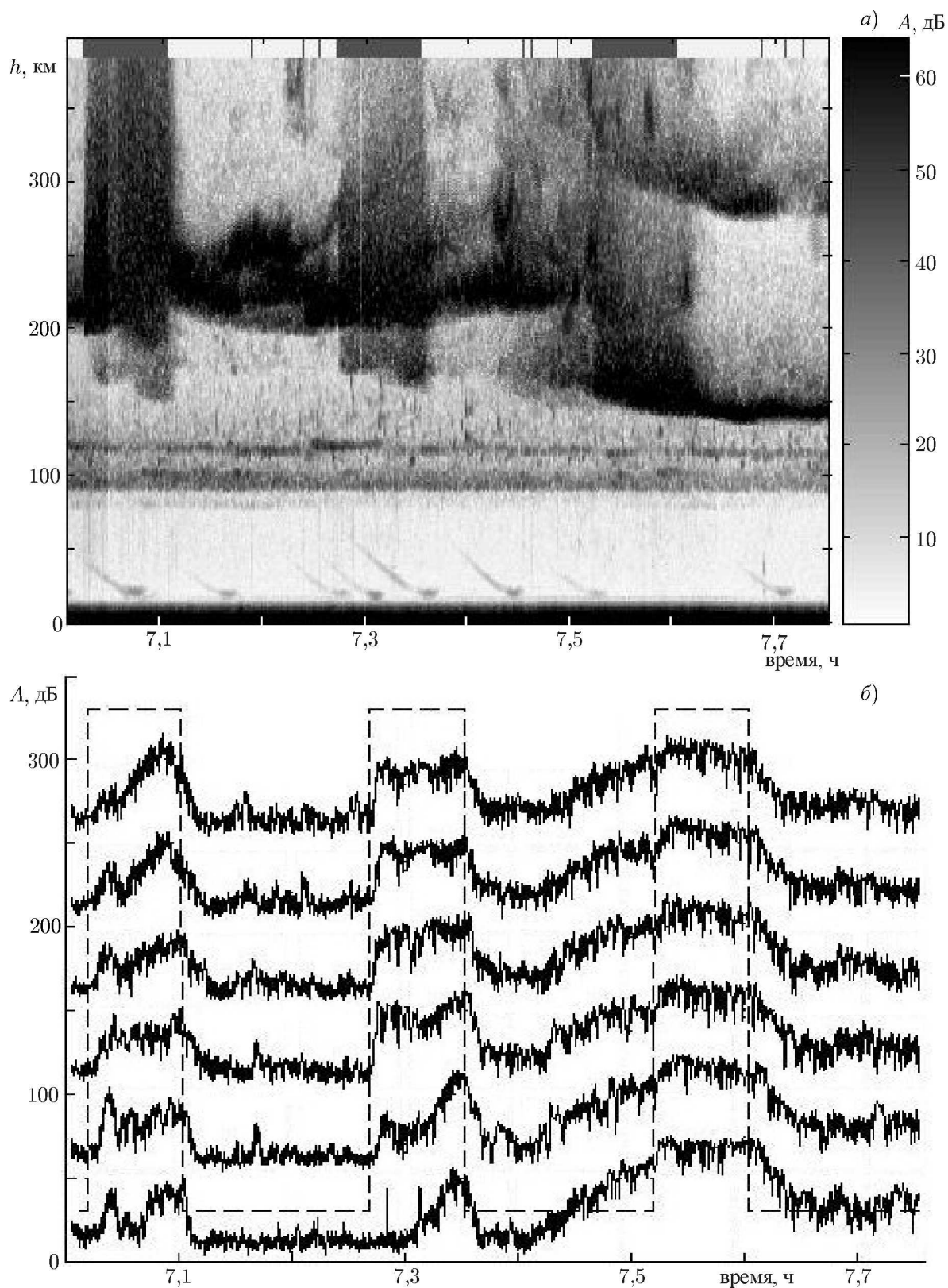


Рис. 3. Пример записи дополнительного сигнала в яркостном виде (а) и зависимость от времени его амплитуды для шести действующих высот, начиная с $h = 163,8$ км с шагом 5,6 км для 19 июня 2011 года (б)

нительный сигнал при регистрации пробной волны обыкновенной поляризации. Область происхождения дополнительного сигнала расширялась вниз и вверх от высоты зеркального отражения пробной волны. В отличие от июньских измерений диапазон действующих высот, с которых исходил этот сигнал, был значительно меньше. В первых сеансах нагрева он составил $70 \div 100$ км, с течением времени и переходом к вечерним часам уменьшился до $10 \div 30$ км. С 19:00 MSK действующие высоты выхода дополнительных сигналов значительно уменьшились, и сигналы стали очень слабо видны на фоне интенсивного зеркально отражённого сигнала.

На рис. 4а приведена яркостная запись амплитуды сигнала обыкновенной поляризации с частотой 2,95 МГц для первых сеансов нагрева. Видны волнообразные изменения высоты зеркального отражения со временем, само зеркальное отражение становится более диффузным, и на фоне таких изменений определение времён развития и релаксации сигнала представляет определённую трудность. Для коротких пятисекундных нагревов изменения характера отражений, коррелировавших с включением нагревного стенда, практически не отмечалось. Критическая частота слоя и рабочая частота нагревного стенда отличались на $\Delta f = 0,5 \div 0,8$ МГц.

Отличительной особенностью вечерних наблюдений 13 сентября являлось развитие в нескольких сеансах отражения от тонкого слоя на высоте чуть ниже (на $10 \div 20$ км по действующей высоте h) зеркального. На рис. 4а этот сигнал виден ниже по высоте от основного зеркально отражённого сигнала для третьего сеанса нагрева. Амплитуда сигнала, отражённого от этого слоя, достигала максимума через 3 мин после начала нагрева. Приблизительно через такое же время заметно расширялся интервал высот, из которого принимались зеркальный и дополнительный сигналы.

Изменение ионосферных условий с течением времени привело к вечерней перестройке отражения обыкновенной и необыкновенной компонент пробной волны. В то время как диапазон высот, в котором наблюдался дополнительный сигнал обыкновенной поляризации, уменьшался, на действующей высоте около 300 км (соответствующие истинные высоты составляют $180 \div 200$ км) появилось диффузное зеркальное отражение в необыкновенной компоненте пробной волны, которая до этого отражалась в E -области, а с 18:30 MSK — и дополнительный сигнал во время нагрева (см. рис. 4б). Эти сигналы принимались до самого окончания работы наряду с менее выраженными дополнительными отражениями сигнала обыкновенной компоненты.

Таким образом, 13 сентября в предвечерние и вечерние часы при нагреве ионосферы радиоволной обыкновенной поляризации наблюдались дополнительные (по отношению к зеркальному) отражения пробной волны в обеих поляризационных компонентах. Было проанализировано соотношение истинных высот отражения пробной и мощной радиоволн по восстановленным из ионограмм вертикального зондирования высотным профилям электронной концентрации. Получено, что в тех сеансах нагрева, когда наблюдались дополнительные сигналы, для обыкновенной компоненты пробной волны эти высоты отличались на $\Delta z_0 = z_{\text{нагр}} - z_{\text{проб}} \approx 60 \div 100$ км, а для необыкновенной — на $\Delta z_x \approx 40 \div 60$ км.

Времена развития и релаксации дополнительного сигнала в целом соответствовали полученным в предыдущих экспериментах авторов [2, 6, 7] и результатам экспериментов, выполненных на этой же трассе и приведённым в [4, 5] с учётом ионосферных условий. Дополнительный сигнал развивался до некоторого стационарного уровня за время $40 \div 80$ с и релаксировал за $50 \div 80$ с. Дополнительный сигнал с высоты ниже высоты зеркального отражения появлялся через $13 \div 30$ с после начала нагрева, а с большей высоты — через $25 \div 120$ с. С учётом разности высот отражения нагревной и пробной волн возмущение распространялось вниз от области резонансного взаимодействия мощной волны с ионосферной плазмой с эффективной скоростью $3 \div 5$ км/с, если полагать, что возмущение распространялось до E -области с высоты отражения мощной волны.

В утренние часы 14 сентября дополнительные отражения наблюдались эпизодически только

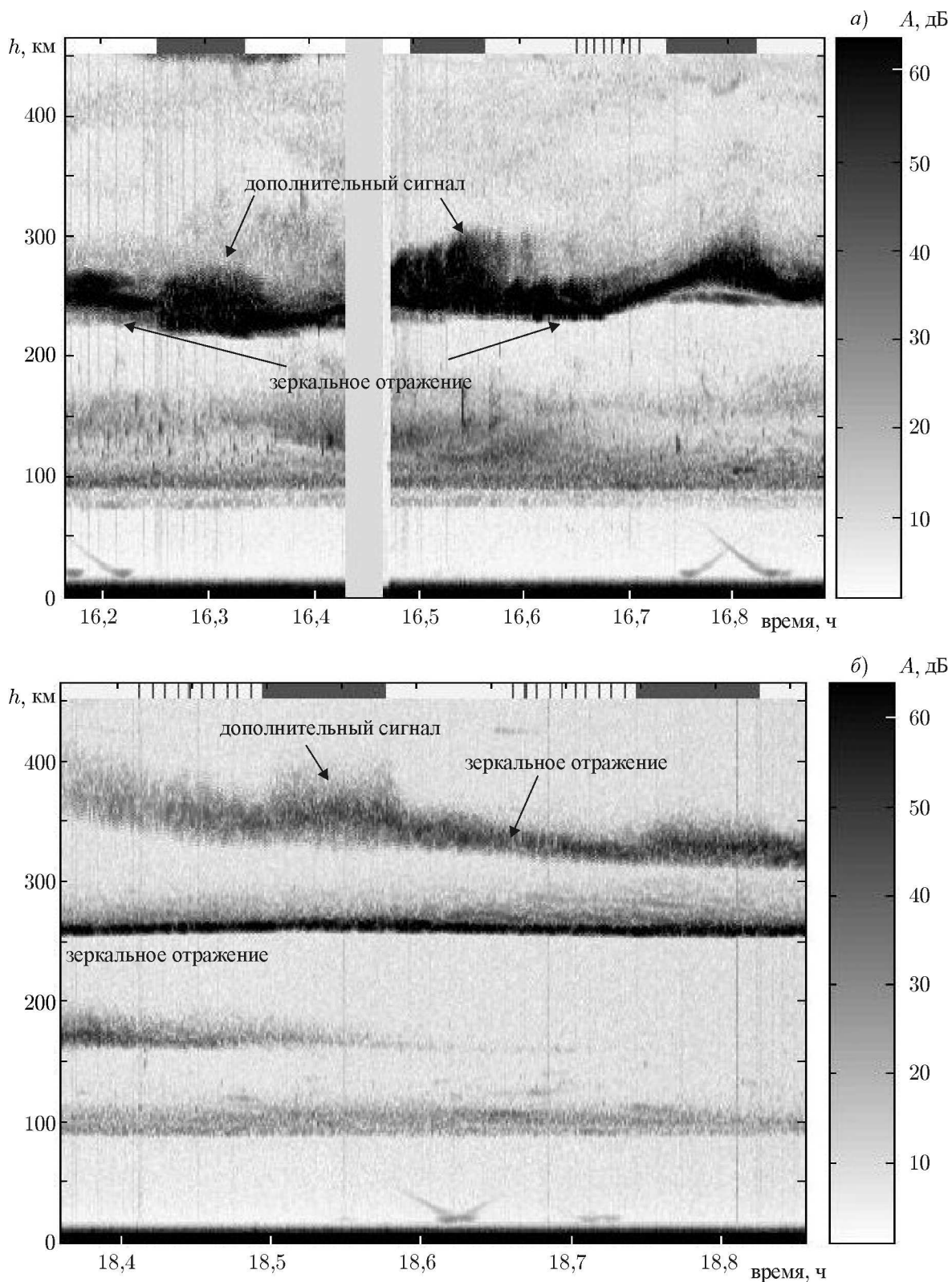


Рис. 4. Пример записи дополнительного сигнала в яркостном виде при пятиминутном нагреве для пробной волны с частотой 2,95 МГц обыкновенной (а) и необыкновенной (б) поляризаций 13 сентября 2011 года

чуть более часа с 09:30 до 10:45 MSK при коротких (5 с) и длинных (5 мин) нагревах. На механизм образования этих отражений, по-видимому, оказали влияние сильно развитая диффузность естественных отражений от E -области ионосферы с критической частотой 3 МГц (что на 0,5 МГц выше частоты пробной волны) и существование спорадического слоя E . В это время критическая частота слоя F_2 и рабочая частота стенда «Сура» отличались на $\Delta f = 1,4 \div 1,7$ МГц, что значительно больше, чем накануне. Разность истинных высот отражения нагревной и пробной радиоволн составила $40 \div 70$ км для обыкновенной и $100 \div 110$ км для необыкновенной волны. Несмотря на, казалось бы, более благоприятные условия для появления значительного дополнительного сигнала (разность высот отражения нагревной и пробной радиоволн для обыкновенной компоненты меньше, чем 13 сентября), этот сигнал не наблюдался.

По-видимому, необходимо сочетание нескольких природных факторов и удачного выбора режима и частоты нагрева, чтобы дополнительные сигналы стабильно наблюдались. Отметим, что, возможно, основную роль играет соотношение частоты нагрева и критической частоты слоя F_2 . Из работ [11, 12] по зондированию возмущённой области из пункта «Зимёнки», расположенного в 110 км от нагревного стенда «Сура», следует, что обратно рассеянный сигнал достигал максимальной амплитуды при разности нагревной и критической частот меньше 1 МГц. Это условие выполнялось и 13 сентября.

При работе нагревного стенда на частоте 5,6 МГц и частоте пробной волны 4,7 МГц, а также при нагреве ионосферы радиоволной необыкновенной поляризации дополнительные сигналы, как и сигналы обратного рассеяния в пункте «Обсерватория», не наблюдались.

3. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗОНДИРОВАНИЯ ВОЗМУЩЁННОЙ ОБЛАСТИ В ДВУХ ПРИЁМНЫХ ПУНКТАХ. ОБСУЖДЕНИЕ

При зондировании ионосферы пробными радиоволнами одновременно в двух наблюдательных пунктах (методом вертикального зондирования вблизи нагревного стенда и методом многочастотного наклонного зондирования в пункте, расположенном в 170 км от стенда) и нагреве ионосферы мощной радиоволной обыкновенной поляризации с эффективной мощностью $50 \div 80$ МВт наблюдались изменения амплитуд сигналов вертикального зондирования и появление сигналов обратного рассеяния, коррелировавшие с моментами включения нагревного стенда.

Возмущение ионосферы в области на $40 \div 120$ км ниже высоты отражения мощной волны проявилось в ярко выраженной диффузности принимаемых сигналов вертикального зондирования и появлении их с тех высот, с которых в отсутствие нагрева они не регистрировались. Эти сигналы были названы дополнительными. Время появления сигнала с этих высот соответствует эффективной скорости распространения возмущения от точки отражения мощной волны до высот нижней ионосферы (до $3 \div 5$ км/с). Времена развития и релаксации дополнительных сигналов в период нагрева на конкретных высотах даёт основание полагать, что их появление (усиление) могло быть связано с ростом электронной концентрации в нижней ионосфере и увеличением амплитуды неоднородностей электронной концентрации при искусственном возмущении ионосферы [23, 24]. В тех случаях, когда высоты отражения мощной и пробной радиоволн отличались на $40 \div 70$ км, дополнительные сигналы во время нагрева наблюдались в обеих поляризациях пробной волны.

При наклонном зондировании возмущённой области в пункте приёма «Обсерватория» при нагреве принимались сигналы обратного ракурсного рассеяния от вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностей плазмы с поперечными размерами $60 \div 190$ м, которые, по расчётам, занимали область истинных высот от 120 до 210 км при высоте отражения мощной волны 250 км. Согласно расчётам траекторий радиолучей, выполненным для реальных профилей электронной концентрации с учётом магнитного поля [21, 22], сигналы наклонного зондирования на самых

нижних частотах пробных радиоволн $f = 2,01 \div 3,51$ МГц рассеивались от искусственных неоднородностей в E -области, расположенных на $100 \div 120$ км ниже высоты отражения мощной волны. Радиоволны более высоких частот обратно рассеивались неоднородностями нижней части F -слоя.

Сопоставляя результаты наблюдений в двух пунктах, обратим внимание на следующие факторы.

1. При наклонном зондировании амплитуда рассеянного сигнала была существенно меньше зеркального. В ряде случаев дополнительный сигнал при вертикальном зондировании имел амплитуду сопоставимую с амплитудой зеркально отражённого сигнала. Несмотря на сравнительно небольшие амплитуды рассеянного сигнала, он практически всегда регистрировался также и на ионограммах.

2. Интервалы высот, с которых принимались обратно рассеянные сигналы в пункте «Обсерватория» и дополнительные сигналы в пункте «Васильсурск», практически не различались: можно констатировать, что наименьшая высота рассеяния была на $40 \div 120$ км ниже высоты отражения мощной волны. Если сигналы происходили вследствие обратного рассеяния от вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностей электронной концентрации, то эти неоднородности должны иметь поперечные размеры от 60 до 190 м, а возмущение — распространяться из области резонансного взаимодействия со скоростью $3 \div 5$ км/с. Отметим, что эффективные скорости распространения возмущения больше 2 км/с были получены в [12, 13] при многочастотном зондировании возмущённой области из приёмного пункта, расположенного в 110 км от стенда «Сура», и объяснялись авторами возрастанием роли теплопроводности при эффективной мощности нагревного стенда порядка 50 МВт. Для эффективной мощности 20 МВт скорости соответствовали диффузионному механизму.

3. При одновременной регистрации сигналов при искусственном возмущении ионосферы эпизодически наблюдались сигналы обратного рассеяния при коротких (5 с) сеансах нагрева. Дополнительные сигналы при вертикальном зондировании практически отсутствовали. Но в экспериментах, проведённых в сентябре 2009, марте и сентябре 2010 годов в пункте «Васильсурск» регистрировались интенсивные дополнительные сигналы во время пяти- или десятисекундных сеансов нагрева, релаксация которых иногда не успевала закончиться до следующего нагрева и продолжалась минуту и более [6].

4. Времена появления дополнительного («Васильсурск») и рассеянного («Обсерватория») сигналов при нагреве несколько отличались и составили $13 \div 30$ с (с высоты ниже высоты отражения зеркально отражённого сигнала) для первого и $5 \div 30$ с для второго сигналов. Дополнительные сигналы на частоте 2,95 МГц развивались до стационарного (или максимального) уровней в течение $10 \div 30$ с при появлении на высотах меньше высоты зеркального отражения и от 25 до 150 с — при появлении на больших высотах. Обратно рассеянные сигналы с близкой частотой 3,11 МГц развивались за $5 \div 10$ с. Время релаксации после окончания нагрева составило до 50 с у рассеянного сигнала и $50 \div 80$ с — у дополнительного.

5. В приёмном пункте «Обсерватория» при наклонном зондировании возмущённой области регистрировались обратно рассеянные сигналы обеих поляризаций. В то же время при вертикальном зондировании в пункте «Васильсурск» дополнительные сигналы необыкновенной поляризации регистрировались вместе с обыкновенной компонентой только в случаях, когда разность высот рассеяния пробной и нагревной радиоволн не превышала $40 \div 70$ км.

6. В обоих пунктах наблюдений рассеянные сигналы при нагреве не были зарегистрированы, когда критическая частота слоя F_2 , где отражалась мощная волна, отличалась от частоты мощной волны больше, чем на 1 МГц.

7. При нагреве ионосферы мощной радиоволной необыкновенной поляризации с частотой 4,7 и 5,6 МГц, а также при нагреве радиоволной обыкновенной поляризации с частотой 5,6 МГц,

дополнительные сигналы и сигналы обратного ракурсного рассеяния не наблюдались.

8. Отметим также, что изменение наклона диаграммы направленности излучения стенда на 12° к югу (что должно было бы усиливать влияние возмущённой области на пробные радиоволны из-за эффекта «магнитного зенита» [25]) в этих экспериментах не имело решающего значения и не сказалось принципиально на результатах эксперимента. Однако это сопоставление проведено только для вертикального зондирования (т. к. одновременных измерений в двух пунктах при разных наклонах диаграммы пока не проводилось), поэтому этот вопрос нуждается в дополнительном экспериментальном исследовании. Приём сигналов обратного рассеяния в пункте «Обсерватория» другими авторами (см., например, [4, 5]) при наклонённой на 12° к югу диаграмме не выявил каких-либо особенностей по сравнению с приведёнными в данной работе.

Анализируя совокупность этих фактов, приходится признать, что пока так и не удалось однозначно интерпретировать результаты обсуждаемых экспериментов и экспериментов, описанных в [2, 6, 7], с точки зрения понимания механизма возмущения, который приводит к появлению обратно рассеянных сигналов при наклонном и дополнительных сигналов при вертикальном зондировании с высот E -области, которые значительно ниже высоты отражения мощной волны.

Несомненно, что сигналы в пункте «Обсерватория» обусловлены обратным рассеянием на анизотропных неоднородностях (брэгговское рассеяние). Как теоретически показано в [23, 25] и убедительно доказано в большом количестве экспериментов, проведённых в разные годы разными коллективами исследователей (см. подробные обзоры [26, 27], эти неоднородности образуются в резонансной области взаимодействия мощной волны обыкновенной поляризации с ионосферной плазмой. Для условий эксперимента E -область находилась вне резонансной области. Поэтому до конца не ясен вопрос, как там появились вытянутые неоднородности.

По порядку величины скорость распространения возмущения вниз близка или превышает скорость прогрева ионосферы вдоль геомагнитного поля. Однако вытянутые неоднородности не могут дать столь интенсивного обратного рассеяния при вертикальном зондировании, к тому же амплитуда дополнительного сигнала даже при коротких нагревах с длительностью 5 с довольно значительна.

В работе [7], где обсуждались возможные механизмы развития искусственного возмущения на высотах E -области и сделан вывод, что основные особенности дополнительных сигналов не противоречат тому, что дополнительные сигналы могли быть результатом возмущения E -слоя ионосферы проходящими радиоволнами (с соответствующим ростом электронной концентрации) и нижней части слоя F_1 . При мощности нагревного стенда $50 \div 80$ МВт электронная концентрация в E -области могла увеличиться на $5 \div 10$ % [22, 24], что должно приводить к росту амплитуды рассеянной пробной волны. А усиление при нагреве естественных неоднородностей с размером больше 200 м и развитие неустойчивостей плазмы при нагреве [24, 28] могло поддерживать дополнительный сигнал при коротких нагревах.

Возможно также (этот вопрос нуждается в более основательном теоретическом анализе в применении к условиям экспериментов), что вытянутые неоднородности распространяются из области отражения мощной волны на высоты нижней ионосферы за счёт вихревого тока, поскольку диффузия в магнитоактивной плазме не является вполне амбиполярной [29]. Возможны и другие механизмы, обсуждение которых выходит за рамки данной работы. По-прежнему остались не вполне понятными сравнительно высокие амплитуды дополнительных сигналов, не выяснена окончательно роль наклона диаграммы направленности излучения стенда в появлении сигналов при нагреве.

Таким образом, результаты исследования характеристик пробных радиоволн при одновременном зондировании возмущённой области ионосферы методом вертикального и многочастотного наклонного зондирования показали, что пока не удаётся однозначно объяснить каким-либо од-

ним механизмом появление рассеянных и дополнительных сигналов во время нагрева на высотах нижней ионосферы при отражении мощной волны в F -области. По-видимому, нужно, выработать новую схему наблюдений, применять разные режимы нагрева с максимальным учётом ионосферных условий, использовать нагрев с непосредственным отражением мощной волны в E -области ионосферы, в частности, от экранирующего спорадического слоя E .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 09–05–00450, 11–02–97028 и 11–02–00374) и Министерства образования и науки РФ (госконтракт 16.518.11.7066).

Авторы выражают благодарность Е. Н. Сергееву за помощь в организации эксперимента и полезные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акчурин А. Д., Ким В. Ю., Панченко В. А. и др. // XXII Всерос. конф. по распространению радиоволн, 22–26 сентября 2008 г., Ростов-на-Дону—п. Лоо. Т. 2. С. 175.
2. Фролов В. Л., Беликович В. В., Бахметьева Н. В., Ушаков А. А. // Докл. XXII Всерос. конф. по распространению радиоволн, 22–26 сентября 2008 г., Ростов-на-Дону—п. Лоо. Т. 2. С. 134.
3. Вертоградов Г. Г., Вертоградова Е. Г., Урядов В. П. и др. // Докл. XXIII Всерос. конф. по распространению радиоволн, 23–26 мая 2011 г., Йошкар-Ола. Т. 2. С. 203.
4. Зыков Е. Ю., Сергеев Е. Н., Акчурин А. Д., Насыров И. А. // Докл. XXIII Всерос. конф. по распространению радиоволн, 23–26 мая 2011 г., Йошкар-Ола. Т. 2. С. 235.
5. Акчурин А. Д., Зыков Е. Ю., Юсупов К. М. и др. // Докл. XXIII Всерос. конф. по распространению радиоволн, 23–26 мая 2011 г., Йошкар-Ола. Т. 2. С. 185.
6. Бахметьева Н. В., Вяхирев В. В., Фролов В. Л., Калинина Е. Е. // Докл. XXIII Всерос. конф. по распространению радиоволн, 23–26 мая 2011 г., Йошкар-Ола. Т. 2. С. 193.
7. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Вяхирев В. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 3.
8. Браницкий А. В., Ким В. Ю., Пучков В. А. и др. // Докл. XXIII Всерос. конф. по распространению радиоволн, 23–26 мая 2011 г., Йошкар-Ола. Т. 2. С. 199.
9. Вертоградов Г. Г., Ким В. Ю., Крашенинников И. В. и др. // Докл. XXIII Всерос. конф. по распространению радиоволн, 23–26 мая 2011 г., Йошкар-Ола. Т. 2. С. 207.
10. Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 4. С. 267.
11. Беликович В. В., Зюзин В. А., Толмачева А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 5. С. 579.
12. Бахметьева Н. В., Игнатьев Ю. А., Шавин П. Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33, № 12. С. 579.
13. Бахметьева Н. В., Игнатьев Ю. А., Дмитриев С. А., Шавин П. Б. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1992. Т. 32, № 3. С. 180.
14. Бахметьева Н. В., Гончаров Н. П., Игнатьев Ю. А. и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1989. Т. 29, № 5. С. 799.
15. Bakhmet'eva N. V., Bubukina V. N., Ignat'ev Yu. A., et al. // J. Atm. Sol. Terr. Phys. 1997. V. 59, No. 18. P. 2257.
16. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Вяхирев В. Д. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1995. Т. 35, № 1. С. 107.
17. Акчурин А. Д., Юсупов К. М. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. Т. 210, вып. 5 (108). С. 49.

18. Гуляева Т. Л. // Методы расчёта и исследования $N(h)$ -профилей ионосферы. М.: ИЗМИРАН, 1973. С. 76.
19. <http://icenter.ismiran.ru>.
20. <http://dps.ismiran.ru>.
21. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.
22. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 684 с.
23. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.
24. Игнатъев Ю. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21, № 3. С. 352.
25. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
26. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // УФН. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
27. Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545.
28. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974.
29. Гуревич А. В., Цедилина Е. Е. // УФН. 1967. Т. 91, вып. 4. С. 609.

Поступила в редакцию 28 декабря 2011 г.; принята в печать 14 февраля 2012 г.

ON FORMATION OF ARTIFICIAL PLASMA PERTURBATIONS IN THE LOWER IONOSPHERE

*N. V. Bakhmetyeva, V. L. Frolov, V. D. Vyakhirev, E. E. Kalinina, I. A. Bolotin,
A. D. Akchurin, and E. Yu. Zykov*

We present the results of experiments aimed at sounding the perturbed region in the ionosphere, which was produced by high-power RF radiation of the “Sura” heating facility, at two observation points simultaneously, one located on the territory of the heating facility, the other, in 170 km to the East from it, at the observatory of Kazan State University (“Observatory”). The experiments were aimed at studying the mechanisms of formation of artificial perturbations in the lower ionosphere in the case of reflection of a high-power wave in the F-region and determining the parameters of the signals of backscattering from artificial electron density irregularities which are formed during ionospheric perturbations. The ionosphere was modified by a high-power RF ordinary-polarization mode, which was emitted by the transmitters of the “Sura” facility, in sessions several seconds or minutes long. The perturbed region was sounded by the vertical-sounding method at the “Vasilsursk” laboratory by using the partial-reflection setup at a frequency of 2.95 MHz and the modified ionospheric station “Tsiklon” at ten frequencies ranging from 2 to 6.5 MHz at the “Observatory”. At the same time, vertical-sounding ionograms were recorded in the vertical regime. At the reception points, simultaneous changes in the amplitudes of the vertical-sounding signals were registered, along with the signals of aspect backscattering, which correlated with the periods of operation of the heating facility. The parameters and dynamics of the signals are discussed.