

УДК 537.87

ЗАПИСИ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА В ТРЁХ ОБСЕРВАТОРИЯХ И СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНЫЕ ВАРИАЦИИ В МИРОВОМ И МЕСТНОМ ВРЕМЕНИ

А. П. Николаенко¹, Е. И. Яцевич¹, А. В. Швец¹, М. Хаякава², Я. Хобара²

¹ Институт радиофизики и электроники НАНУ, г. Харьков, Украина

² Университет электросвязи, Чофу, Токио, Япония

К данным по шумановскому резонансу, полученным в трёх обсерваториях: Мошири (44,365° с. ш., 142,24° в. д.), Лехта (64,427° с. ш., 33,974° в. д.) и Вест Гринвич (41,6° с. ш., 71,6° з. д.), применена методика разделения временных изменений интенсивности шумановского резонанса на вариации в мировом и местном времени. С помощью численного моделирования обоснована допустимость применения методики к совместным данным трёх обсерваторий. Показано, что универсальные вариации описывают изменения интенсивности мировых гроз.

ВВЕДЕНИЕ

Шумановский резонанс возбуждается разрядами молний в полости, сформированной земной поверхностью и ионосферой. Шумановский резонанс наблюдается в энергетических спектрах естественного электромагнитного излучения в виде отдельных пиков в сверхнизкочастотном (СНЧ) диапазоне около 8; 14; 20; 26; 32; ... Гц [1, 2].

Резонансный сигнал, измеренный в произвольной точке Земли, зависит как от универсальных характеристик источников и резонатора (одинаковых для любой точки наблюдений), так и от локальных (зависящих от положения наблюдателя). Например, интенсивность шумановского резонанса определяется суммарной интенсивностью мировых гроз и пространственным распределением гроз относительно наблюдателя. Здесь суммарная интенсивность источников является универсальной характеристикой, а зависимость сигнала шумановского резонанса от взаимного расположения приёмника и источников — локальной. При изучении мировой грозовой активности или нижней ионосферы с помощью шумановского резонанса, возникает необходимость разделить сигнал шумановского резонанса на универсальные и локальные факторы. Так, для получения адекватных оценок суммарной интенсивности мировых гроз из вариаций интенсивности шумановского резонанса необходимо исключить или, по крайней мере, уменьшить, зависимость сигнала от геометрии наблюдатель—источники.

Метод разделения временных изменений интенсивности шумановского резонанса на универсальные и локальные вариации, т. е. на вариации, происходящие в мировом и местном времени, предложили Сентман и Фрейзер в работе [3]. Авторы интерпретировали изменения в местном времени как влияние на сигнал локальной высоты ионосферы над пунктом регистрации, а универсальные модуляции — как изменение уровня глобальной грозовой активности.

В следующей работе [4], посвящённой этой тематике, с помощью моделирования было показано, что существенные локальные модуляции присутствуют в сигнале и в случае однородной ионосферы. Отсюда следовало заключение о том, что локальные вариации сигнала связаны, главным образом, с изменением расположения источников относительно наблюдателя.

Метод получил дальнейшее развитие в работе [5], авторы которой учли высшие члены разложения при вычислении локальных и универсальных вариаций. Также в статье [5] усовершенствованная методика была проверена на данных по шумановскому резонансу двух обсерваторий — Лехты и Мошири.

В настоящей работе методика разделения временных изменений интенсивности шумановского резонанса на вариации в мировом и местном времени будет применена к экспериментальным данным трёх обсерваторий: Мошири, Япония ($44,365^\circ$ с. ш., $142,24^\circ$ в. д.), Лехта, Россия ($64,427^\circ$ с. ш., $33,974^\circ$ в. д.) и Вест Гринвич, США ($41,6^\circ$ с. ш., $71,6^\circ$ з. д.). Кроме того, с помощью моделирования будет обоснована допустимость применения методики к совместным данным указанных обсерваторий.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Обозначим через $P_1(t_U, \lambda_1)$ и $P_2(t_U, \lambda_2)$ интенсивности шумановского резонанса, записанные в двух различных обсерваториях с восточными долготами λ_1 и λ_2 соответственно.

Предполагается, что интенсивность шумановского резонанса $P_1(t_U, \lambda_1)$, записанная в произвольной точке как функция мирового времени t_U , является произведением универсальной функции мирового времени $U(t_U)$ и локальной функции местного времени $L(t_L)$:

$$P(t_U, \lambda) = U(t_U)L(t_L). \quad (1)$$

Локальное время связано с мировым временем и долготой соотношением $t_L = t_U + \lambda$, где все величины измеряются в радианах и лежат в диапазоне от 0 до 2π .

Функция мирового времени $U(t_U)$ одинакова в любой точке наблюдений по своему определению. Кроме этого, предполагается, что для пары обсерваторий локальная модуляция $L(t_L)$ в зависимости от местного времени также одинакова. Таким образом, для первой и второй обсерваторий локальный множитель в зависимости от мирового времени имеет следующий вид:

$$L_1(t_U) = L(t_U + \lambda_1), \quad L_2(t_U) = L(t_U + \lambda_2). \quad (2)$$

Функция $L(t_L)$ является комплексной периодической функцией с периодом 2π . Физический смысл имеет только её реальная часть. Локальный множитель, соответствующий обсерватории с долготой λ_1 , можно представить в виде ряда Фурье:

$$L_1(t_U) = L(t_U + \lambda_1) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp[in(t_U + \lambda_1)]. \quad (3)$$

Комплексные амплитуды A_n определяют величину и начальную фазу модуляций и удовлетворяют условию

$$A_0 = 1, \quad |A_n|^2 \ll 1 \text{ при } n > 1. \quad (4)$$

При выполнении вышеприведённых условий верно следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \ln(P_1/P_2) &= \ln(L_1) - \ln(L_2) \approx \\ &\approx A_1 \{ \exp[i(t_U + \lambda_1)] - \exp[i(t_U + \lambda_2)] \} + A_2 \{ \exp[2i(t_U + \lambda_1)] - \exp[2i(t_U + \lambda_2)] \} + \dots = \\ &= A_1 \exp(it_U) [\exp(i\lambda_1) - \exp(i\lambda_2)] + A_2 \exp(2it_U) [\exp(2i\lambda_1) - \exp(2i\lambda_2)] + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

Неизвестные комплексные амплитуды A_n определяются из выражения (5) путём умножения правой и левой частей (5) на $\exp(-it_U)$ и интегрирования от 0 до 2π :

$$A_n = \{ 2\pi [\exp(i\lambda_1 n) - \exp(i\lambda_2 n)] \}^{-1} \int_0^{2\pi} dt_U \ln(P_1/P_2) \exp(-it_U n). \quad (6)$$

Заметим, что для пар наблюдательных пунктов, имеющих долготы, обращающие в нуль знаменатель в (6), метод применять нельзя.

В разложении (3) мы ограничимся первыми пятью слагаемыми. Определив амплитуды A_n по формуле (6) и подставив их в (3), находим модулирующие функции $L_1(t_U)$ и $L_2(t_U)$. Затем из (1) получаем функции мирового времени $U_1(t_U) = P_1(t_U)/L_1(t_U)$ и $U_2(t_U) = P_2(t_U)/L_2(t_U)$.

Таким образом по данным пары обсерваторий мы получаем две оценки для универсальной вариации $U_1(t_U)$ и $U_2(t_U)$ и одну для локальной $L(t_L)$. Оценки, очевидно, тем точнее, чем ближе реальная ситуация к выполнению условия (2).

Более простой вариант оценки суммарной интенсивности мировых гроз, основанный на геометрическом среднем записей, был предложен в статье [5]. С помощью геометрического среднего можно получать оценки по данным двух

$$G_{1,2}(t_U) = \sqrt{P(t_U, \lambda_1)P(t_U, \lambda_2)} \quad (7)$$

или большего количества обсерваторий

$$G_{1,2,3,\dots,N}(t_U) = \sqrt[N]{P(t_U, \lambda_1)P(t_U, \lambda_2)P(t_U, \lambda_3)\dots P(t_U, \lambda_N)}. \quad (8)$$

Вывод работы [5] состоял в том, что среднее геометрическое интенсивностей шумановского резонанса, полученных в различных точках наблюдения является более точной оценкой интенсивности глобальных гроз, чем оценки, полученные по данным одной обсерватории. Физическое объяснение этого факта довольно простое: когда грозы приближаются к одной обсерватории, они одновременно отстают от другой (при условии, что пункты разнесены вдоль долготы). Поэтому произведение интенсивностей шумановского резонанса, записанных в нескольких пунктах, меньше зависит от движения источников, чем отдельные интенсивности.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Одновременные измерения сверхнизкочастотного поля осуществлялись в обсерваториях Мошири, Лехта и Вест Гринвич на протяжении двух с половиной лет (с августа 1999 по декабрь 2001 года). Измерялась горизонтальная магнитная компонента поля H_φ . Интенсивности шумановского резонанса, полученные в каждой из обсерваторий, были проинтегрированы в полосе частот, охватывающей три первых мода шумановского резонанса, а затем суточные вариации интенсивностей были усреднены за каждый месяц. Таким образом, для каждого месяца совместных наблюдений, мы получили набор из трёх записей средних за месяц суточных вариаций интенсивности магнитного поля H_φ . Применим метод разделения временных вариаций интенсивности шумановского резонанса на вариации в мировом и местном времени к экспериментальным данным трёх пар обсерваторий: Лехта—Мошири, Лехта—Вест Гринвич и Мошири—Вест Гринвич. На рис. 1 продемонстрированы результаты работы метода для данных за октябрь 2000 года. В первой строке панелей на рис. 1 даны исходные суточные вариации интенсивности I_φ компоненты магнитного поля H_φ в мировом времени (в обозначениях методики — $P_1(t_U)$ и $P_2(t_U)$), во второй строке панелей представлены локальные вариации в зависимости от локального времени $L(t_L)$, в третьей — универсальные вариации $U_1(t_U) = P_1(t_U)/L(t_U + \lambda_1)$ и $U_2(t_U) = P_2(t_U)/L(t_U + \lambda_2)$. Для каждой пары данных верно следующее утверждение. Суточные вариации $P_1(t_U)$ и $P_2(t_U)$, записанные в двух обсерваториях, заметно отличаются друг от друга. Это отличие очевидно связано с влиянием локальных факторов, что подтверждается полученными функциями $L(t_L)$. Действительно, как видно из рис. 1, функции $L(t_L)$ в течение суток изменяются примерно в 2 раза. С учётом того, что изменение $P_1(t_U)$ и $P_2(t_U)$ не превосходит 3,5 раз, влияние локальных условий значительно.

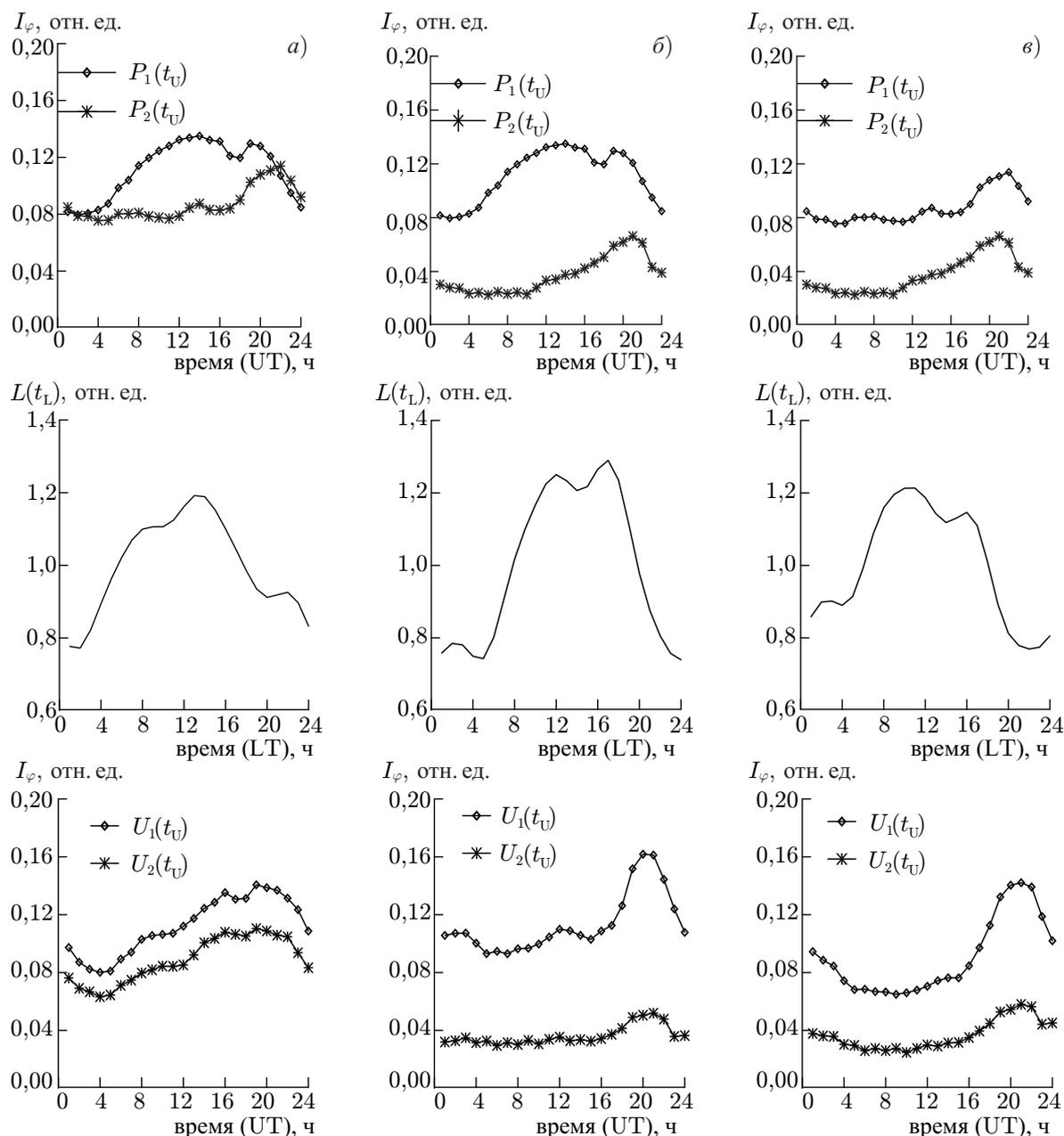


Рис. 1. Результаты применения методики разделения суточных вариаций интенсивности шумановского резонанса на вариации в мировом и местном времени к экспериментальным данным (за октябрь 2000 года) трёх пар обсерваторий: Лехта—Мошири (столбец панелей *a*), Лехта—Вест Гринвич (*b*) и Мошири—Вест Гринвич (*c*)

Можно видеть, что подобие универсальных функций $U_1(t_U)$ и $U_2(t_U)$ много лучше, чем подобие исходных функций $P_1(t_U)$ и $P_2(t_U)$. Заметим, что средние значения $U_1(t_U)$ и $U_2(t_U)$ не совпадают.

Причиной этого является то, что различаются средние значения $P_1(t_U)$ и $P_2(t_U)$, а функция $L(t_L)$ определяется таким образом, что её среднее равно единице. Расхождение функций $P_1(t_U)$ и $P_2(t_U)$ может быть связано как с расположением обсерваторий, так и с систематической ошибкой во взаимной калибровке в пунктах измерений.

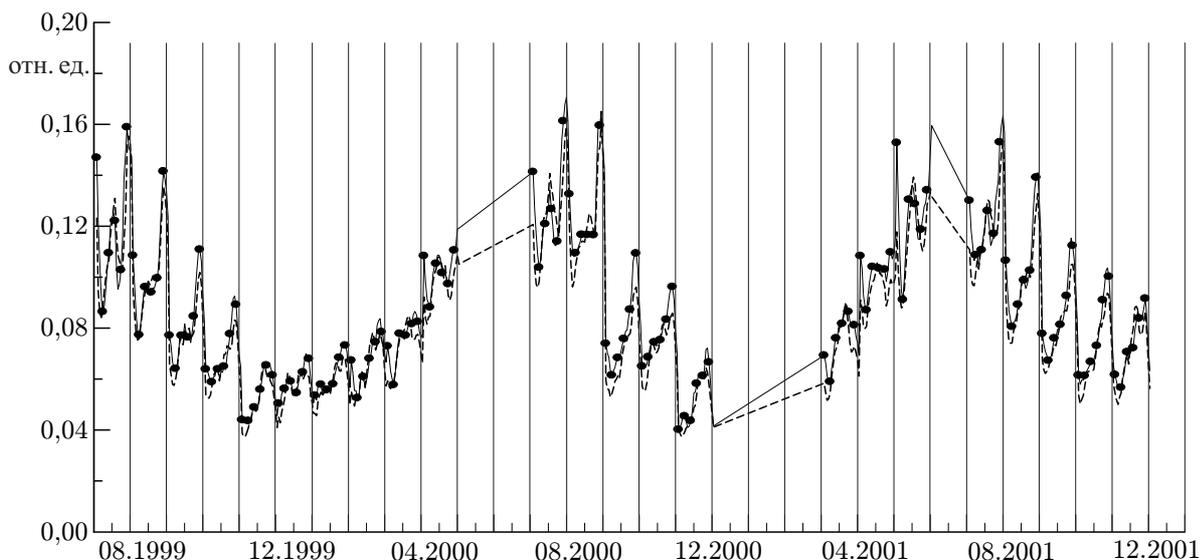


Рис. 2. Сравнение двух вариантов оценки универсальных множителей: средней универсальной суточной вариации $\langle U_k(t_U) \rangle$ (линия с точками) и независимой оценки с помощью метода, основанного на геометрическом среднем (пунктирная линия)

Сравним между собой результаты, полученные для отдельных пар данных. По данным трёх обсерваторий мы получили шесть оценок универсальной функции и три оценки локальной.

Три зависимости во второй строке рис. 1 отражают локальное изменение сигнала шумановского резонанса. Как видим, функции $L(t_L)$, полученные по различным парам обсерваторий, не совпадают, но при этом имеют схожие свойства и сравнительно близкие значения. Их взаимные отклонения характеризуют степень достоверности предположения (2). Как показала статистическая обработка данных, проведённая по данным всех месяцев наблюдений, типичное значение стандартного отклонения составляет 10 %. Для геофизических данных это вполне приемлемый результат. Таким образом, результаты, полученные по трём отдельным парам данных не противоречат друг другу, что говорит об устойчивости используемой методики.

Статистическая обработка данных также показала, что шесть оценок универсальных функций $U_k(t_U)$ (где k — номер оценки, $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) ближе между собой, чем исходные данные $P_r(t_U)$ (где r — номер обсерватории, $r = 1, 2, 3$). Так, стандартное отклонение, полученное по вариациям $U_k(t_U)$ не превосходит 25 % от среднего $\langle U_k(t_U) \rangle$, в то время как аналогичная величина, полученная по $P_r(t_U)$, может достигать 45 %. Этот результат подтверждает предположение о том, что извлечённые из сигнала шумановского резонанса зависимости $U_k(t_U)$ лучше характеризуют глобальные изменения шумановского резонанса, чем исходные вариации. Следовательно, среднее универсальных функций $\langle U_k(t_U) \rangle$ является более точной оценкой вариаций интенсивности мировых гроз, чем вариации $P_r(t_U)$. Дополнительная проверка этого результата будет сделана в следующем пункте статьи.

На рис. 1 можно видеть, что у всех трёх вариантов функции $L(t_L)$ присутствует послеполуденный максимум. Этот максимум естественно интерпретировать следующим образом — в послеполуденное время зоны максимальной грозовой активности ближе всего подходят к наблюдателю, следовательно интенсивность шумановского резонанса возрастает. Таким образом, интерпретация $L(t_L)$ как функции местного времени, отражающей зависимость сигнала от геометрии наблюдатель—источники, вполне возможна. Проверка этого предположения также будет сделана в следующем пункте статьи.

Описанная процедура была применена ко всему ряду данных по шумановскому резонансу

(с августа 1999 по декабрь 2001 года). На рис. 2 для каждого месяца наблюдений линией с точками показана средняя универсальная суточная вариация $\langle U_k(t_U) \rangle$ (рисунок 2 состоит из 29 отдельных полос, соответствующих 29 месяцам наблюдений, в каждой полосе представлена суточная вариация $\langle U_k(t_U) \rangle$, соответствующая данному месяцу). Дополнительно, мы получили независимую оценку универсальной вариации с помощью метода, основанного на геометрическом среднем (пунктирная кривая). Как видим, обе методики дают примерно одинаковые результаты, что свидетельствует о достоверности полученных оценок суммарной интенсивности мировых гроз. Заметим, что получение подобных данных о грозовой активности другими способами (метеорологические и космические наблюдения) чрезвычайно трудоёмко.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

С помощью моделирования проверим допустимость применения методики разделения сигнала шумановского резонанса на вариации в мировом и локальном времени для обсерваторий Лехта, Мошири и Вест Гринвич. Проверим также предположение о том, что локальный множитель связан с взаимным расположением приёмник—источники, а универсальный множитель характеризует вариации интенсивности мировых гроз.

Рассмотрим вначале такую модель источников и расположения обсерваторий, для которой выполняется условие (2). Расчёты шумановского резонанса проведём в модели одного кругового компактного источника [2, 6]. Радиус источника $A = 15^\circ$, центр источника движется строго по экватору и совпадает с точкой, локальное время которой равно 17 ч. Резонатор предполагается однородным и изотропным. Предположение (2) выполняется в случае, если в двух точках наблюдения суточные вариации расстояния между наблюдателем и источником совпадают в локальном времени. Для используемой модели это условие выполняется тогда и только тогда, когда широты наблюдателей одинаковы. Выберем положение пунктов следующим образом: обсерватория 1 (40° с. ш., 30° в. д.), обсерватория 2 (40° с. ш., 135° в. д.).

На рис. 3а, б сплошными кривыми без символов показано, как в течение суток при движении источника изменяется расстояние между наблюдателем и центром источника $D_1(t_U)$, $D_2(t_U)$ в двух обсерваториях. Значения расстояния в мегаметрах отмечены на правой оси ординат. Мировое время суток отложено на оси абсцисс. Изменение расстояния между источником и приёмни-

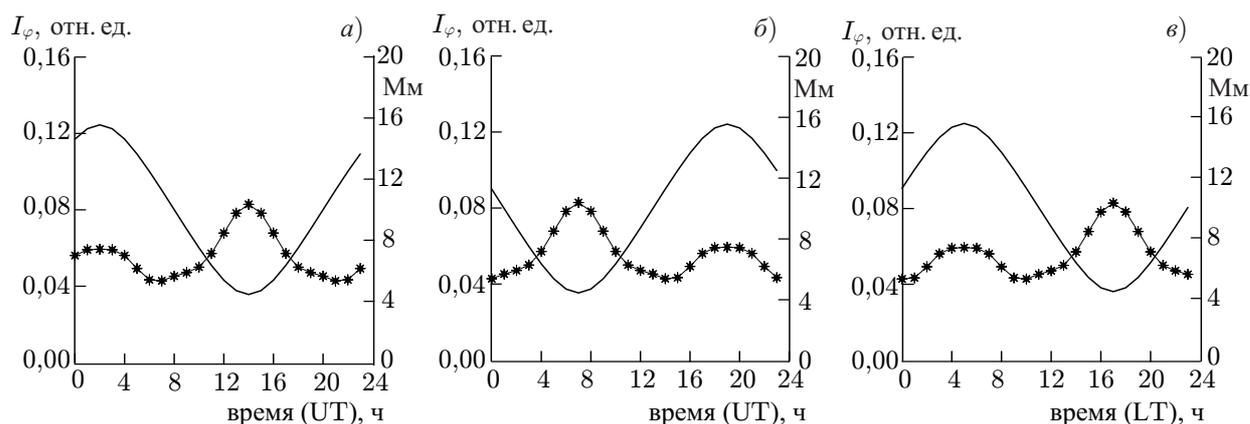


Рис. 3. Суточные вариации расстояния между наблюдателем и источником (сплошные кривые без символов) и интенсивности компоненты H_φ (кривые со звездочками), рассчитанные в модели одного источника постоянной интенсивности. Панель а соответствует данным для обсерватории 1 (мировое время), панель б — обсерватории 2 (мировое время), панель в — обсерваториям 1 и 2 (локальное время)

ком вызывает изменение сигнала шумановского резонанса в пункте приёма. На рис. 3а, б кривыми со звёздочками показано, как для рассматриваемого случая движения источника изменяются интенсивность магнитного поля $I_1^\varphi(t_U)$, $I_2^\varphi(t_U)$ в каждой из обсерваторий. Значения $I_1^\varphi(t_U)$, $I_2^\varphi(t_U)$ в относительных единицах отмечены на левой оси ординат.

На рис. 3в рассматриваемые функции построены в зависимости от локального времени. В местном времени вариации дистанции, а следовательно, и вариации интенсивности для двух обсерваторий очевидно совпадают. Функции $D_1(t_L) = D_2(t_L)$ имеют следующий вид: в 17:00 LT расстояние между источником и приёмником минимально и составляет 4,2 Мм; в 05:00 LT расстояние максимально и равно 15,8 Мм.

Применим методику разделения к модельным данным. Рассмотрим модели, в которых интенсивность источника постоянна (рис. 4а) и переменна (рис. 4б).

Если интенсивность движущегося источника постоянна, то суточные вариации поля шумановского резонанса связаны только с изменением расстояния между наблюдателем и центром источника. В этом случае суточные вариации интенсивности компоненты H_φ совпадают с вариациями, представленными на рис. 3, и одинаковы в локальном времени. Как видим, универсальные вариации $U_1(t_U)$ и $U_2(t_U)$, полученные для такого варианта модели, равны с точностью до величин малого порядка константе — т. е. интенсивности источника.

Если интенсивность источника меняется в течение суток (рис. 4б), то суточные вариации интенсивности компоненты магнитного поля H_φ из рис. 3 умножаются на одну и ту же функцию от мирового времени $I_S(t_U)$. Для этого случая оценки интенсивности $U_1(t_U)$ и $U_2(t_U)$ совпадают с точностью до постоянного множителя с $I_S(t_U)$ (см. третью строку в рис. 4б, где вместе с функциями $U_1(t_U)$ и $U_2(t_U)$ построена используемая в модели зависимость интенсивности источника от времени суток $I_S(t_U)$).

Из второй строки панелей на рис. 4 видно, что локальная функция для двух вариантов модели одинакова. Функция $L(t_L)$ с точностью до постоянного множителя (и с точностью до величин малого порядка) равна $I^\varphi(t_L)$ из рис. 3в, т. е. равна вариациям поля, вызванным изменением расстояния наблюдатель—центр источника.

Таким образом, в случае расположения пары обсерваторий, при котором их дистанционная зависимость наблюдатель—источник совпадает в локальном времени, функция $L(t_L)$ описывает зависимость сигнала шумановского резонанса от расстояния, а $U_1(t_U)$ и $U_2(t_U)$ характеризуют глобальные вариации интенсивности источников шумановского резонанса.

Проведём теперь моделирование для трёх обсерваторий, участвующих в эксперименте. На рис. 5 показаны суточные вариации расстояния между наблюдателем и источником (сплошные кривые без символов) и связанные с ними изменения интенсивности компоненты H_φ (кривые со звёздочками), рассчитанные для Лехты, Мошири и Вест Гринвича в модели одного источника постоянной интенсивности. (Параметры модели использовались те же, что и для предыдущего случая).

На рис. 6 вариации расстояния между наблюдателем и источником и интенсивности компоненты H_φ для трёх обсерваторий показаны в зависимости от местного времени. Для рассматриваемых точек наблюдения зависимости расстояний между приёмником и источником не совпадают в местном времени. Следовательно, не совпадают и вариации интенсивности компоненты H_φ , связанные с изменением расстояния. Таким образом, условие (2) не выполняется. Однако можно заметить, что в вариациях расстояний, построенных в местном времени, есть общие черты. Так, для каждого из пунктов, в 17:00 LT расстояние между источником и приёмником минимально, а в 05:00 LT максимально. Соответственно, для всех трёх обсерваторий вариация интенсивности компоненты H_φ имеет схожий вид. Максимумы кривых соответствуют максимальному и минимальному расстояниям между источником и наблюдателем.

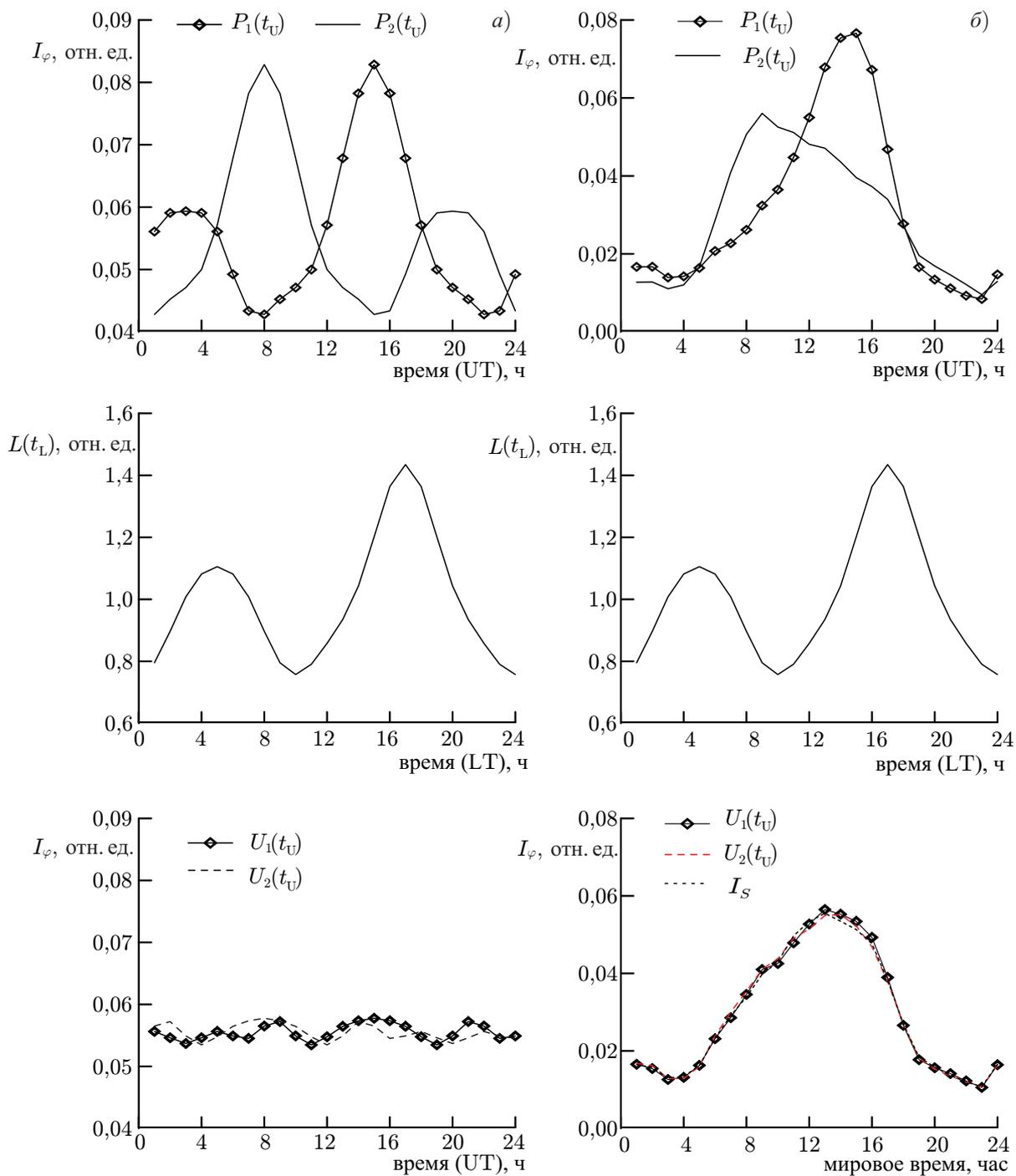


Рис. 4. Разделение на глобальные и универсальные суточные вариации расчётных суточных вариаций интенсивности I_φ компоненты H_φ для пары обсерваторий 1 и 2. Столбец панелей *a* соответствует модели с постоянной интенсивностью источника, панели *b* — модели с переменной интенсивностью

На рис. 7 показаны результаты разделения на локальные и универсальные изменения интенсивности компоненты H_φ , рассчитанные для трёх пар обсерваторий в модели одного источника переменной интенсивности. На рис. 7*a* представлены данные для пары Лехта—Мошири, 7*b* — для

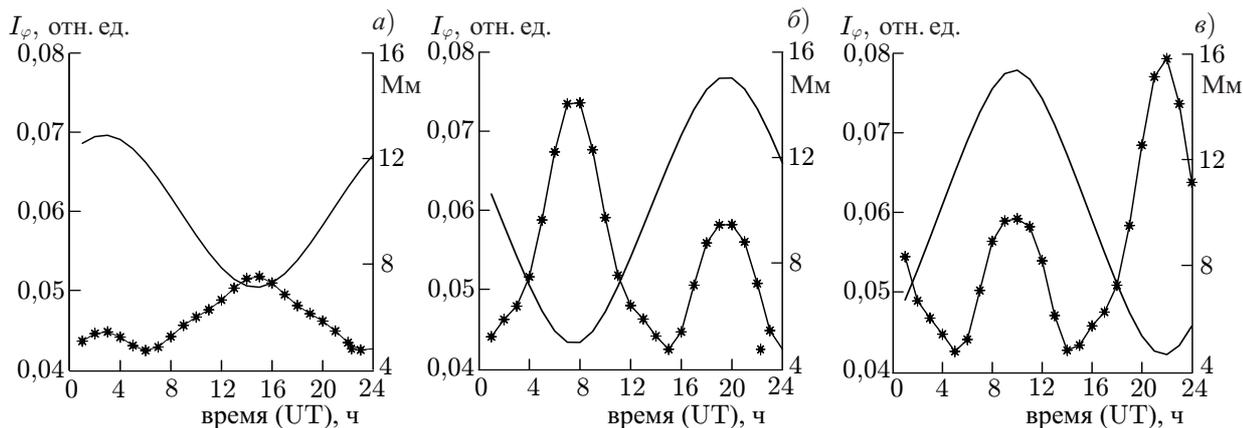


Рис. 5. Суточные вариации расстояния между наблюдателем и источником (сплошные кривые без символов) и интенсивности компоненты H_φ (кривые со звёздочками) в модели одного источника постоянной интенсивности, рассчитанные для обсерваторий Лехта (а), Мошири (б) и Вест Гринвич (в)

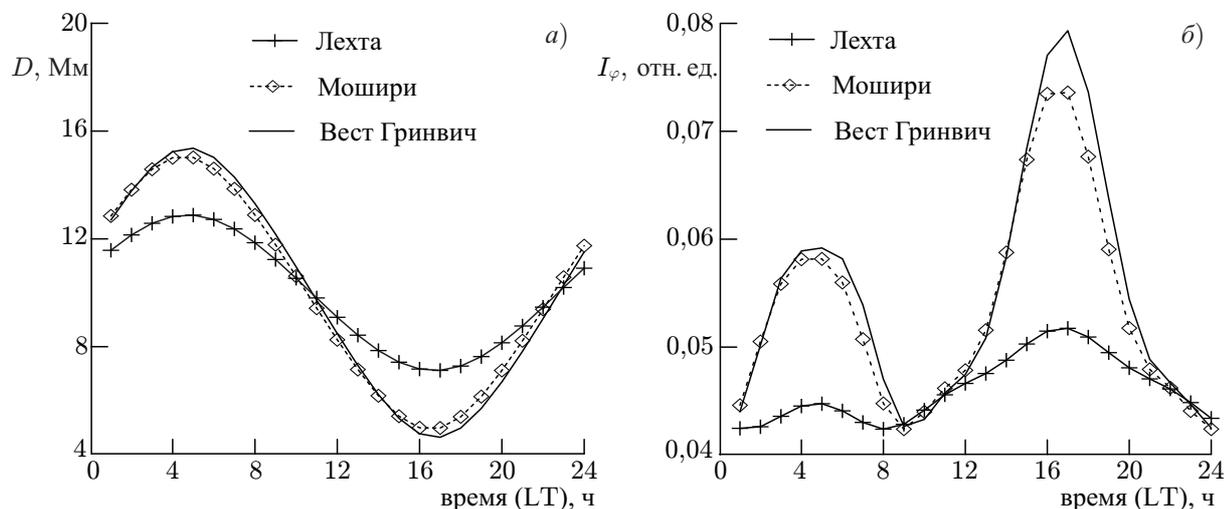


Рис. 6. Суточные вариации расстояния между наблюдателем и источником и интенсивности компоненты H_φ для обсерваторий Лехта, Мошири и Вест Гринвич, построенные в локальном времени

пары Лехта—Вест Гринвич, 7в — для пары Мошири—Вест Гринвич. В первой строке панелей представлены попарно суточные вариации интенсивности компоненты H_φ . Во второй строке панелей показана локальная модулирующая функция $L(t_L)$ в локальном времени. В третьей строке панелей показаны универсальные вариации $U_1(t_U)$, $U_2(t_U)$ и используемая в модели зависимость интенсивности движущегося источника от времени суток $I_S(t_U)$. (Для того, чтобы можно было сравнить $U_1(t_U)$, $U_2(t_U)$ и $I_S(t_U)$ на одном графике, интенсивность источника $I_S(t_U)$ делилась на константу. Константа для каждой пары данных выбиралась так, чтобы средние значения сравниваемых зависимостей совпадали).

Можно видеть, что в рассматриваемом случае для пары обсерваторий получается некоторая «совместная» локальная функция, выделяющая общие свойства у двух истинных локальных изменений. Сравним полученные функции $L(t_L)$ (рис. 7) с суточными вариациями интенсивности компоненты H_φ (рис. 6). Очевидно, что извлечение из исходных интенсивностей $P_1(t_U)$ и $P_2(t_U)$ «совместной» локальной функции не устраняет полностью локальную зависимость сигнала, однако существенно её ослабляет. Действительно, как видим, для каждой из пар обсерваторий уни-

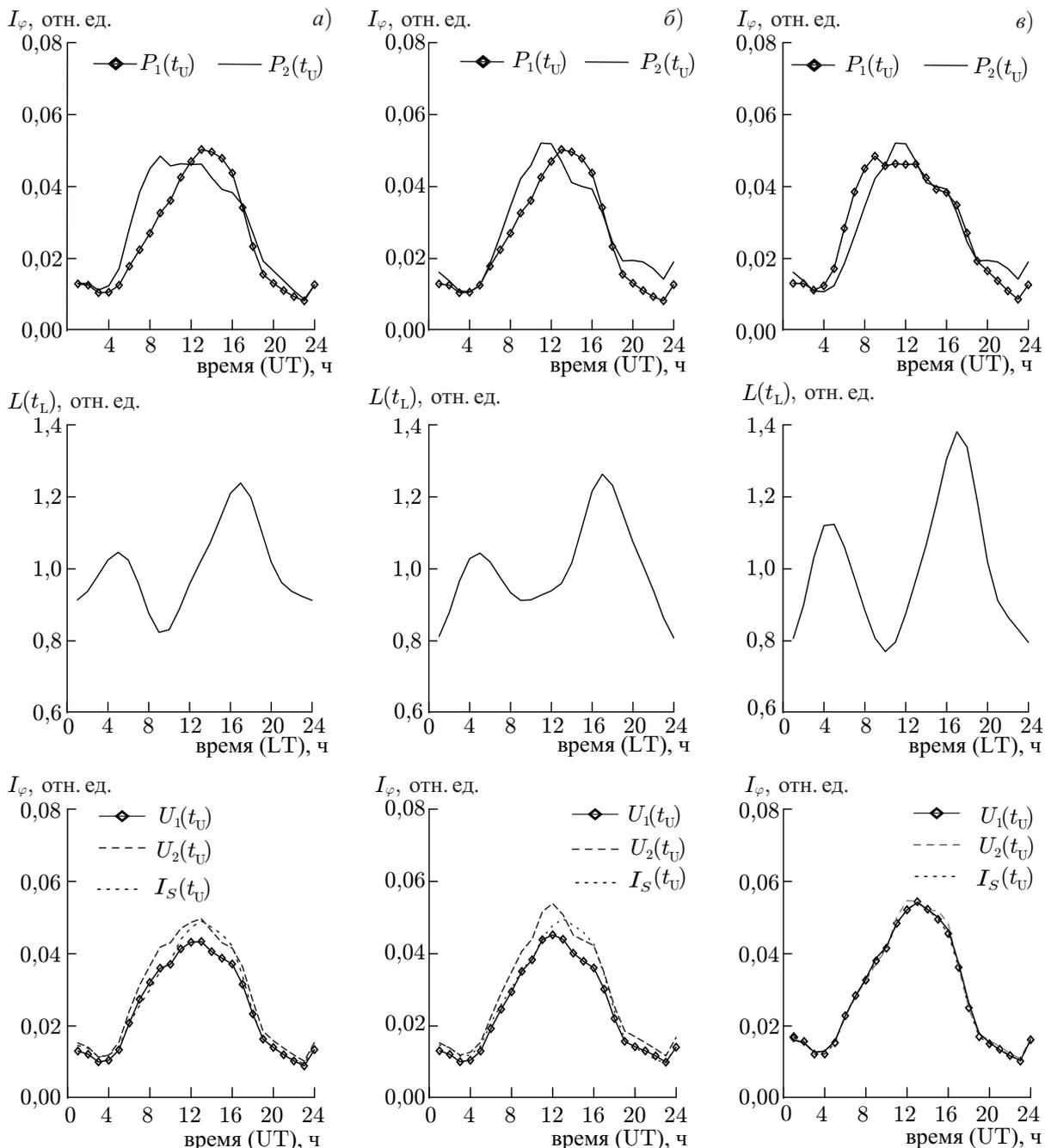


Рис. 7. Разделение на универсальные и локальные суточные вариации расчётных данных (модель одного источника) для трёх пар обсерваторий Лехта—Мошири (столбец панелей *а*), Лехта—Вест Гринвич (*б*) и Мошири—Вест Гринвич (*в*)

версальные функции $U_1(t_U)$ и $U_2(t_U)$ значительно ближе друг к другу и к истинной глобальной вариации источника $I_S(t_U)$, чем исходные интенсивности $P_1(t_U)$ и $P_2(t_U)$.

Проведённая статистическая обработка данных показала, что отклонение средней универсальной вариации $\langle U_k(t_U) \rangle$ от исходной интенсивности $I_S(t_U)$ не превосходит 5 %, что является очень хорошей точностью. Таким образом, если в двух обсерваториях суточные вариации расстояния между приёмником и источником в зависимости от локального времени имеют схожий

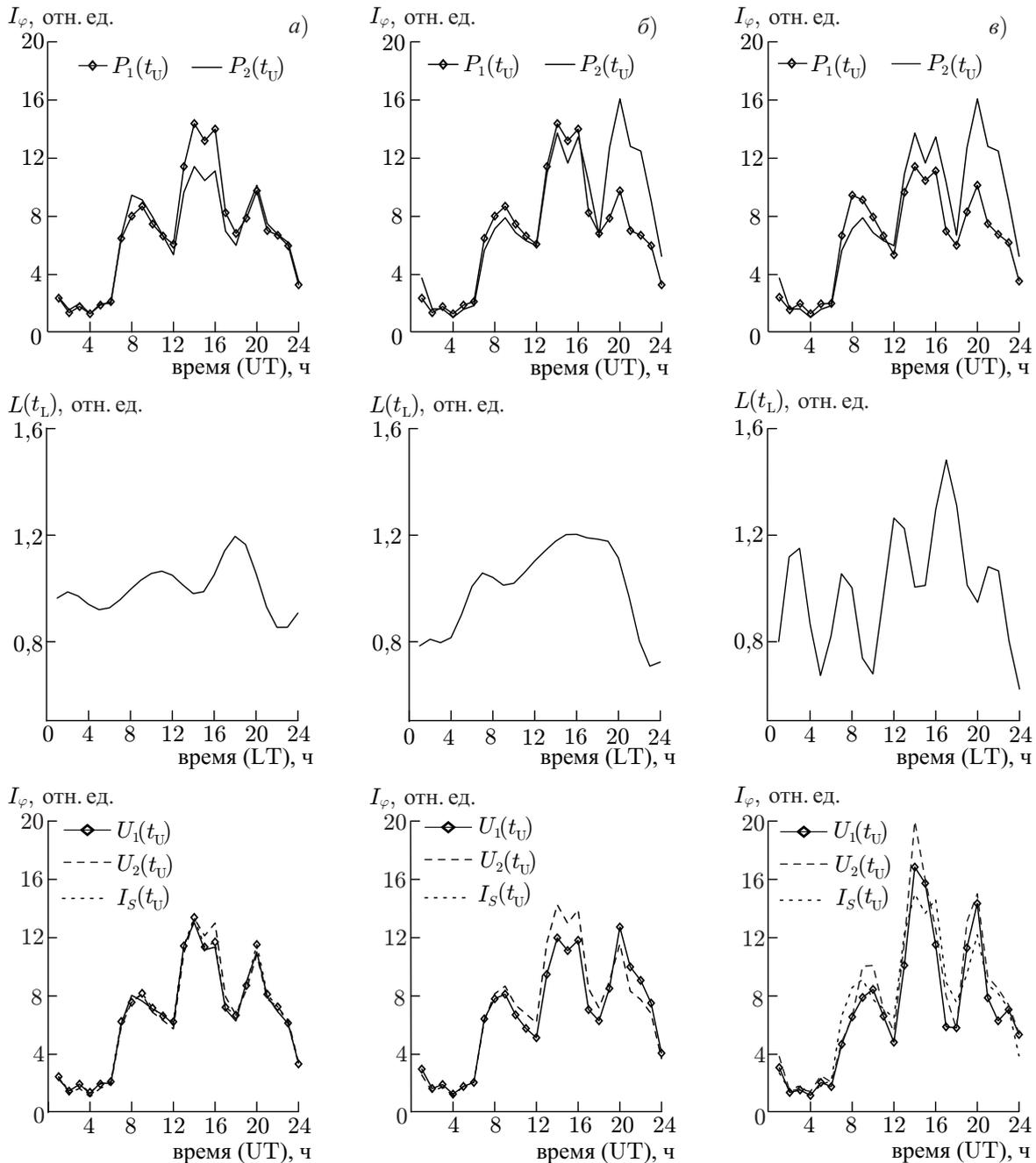


Рис. 8. Разделение на универсальные и локальные суточные вариации расчётных данных (модель, основанная на данных аппарата OTD) для трёх пар обсерваторий Лехта—Мошири (столбец панелей *a*), Лехта—Вест Гринвич (*б*) и Мошири—Вест Гринвич (*в*)

вид, применение методики даёт адекватные результаты.

Более сложную картину взаимного расположения источников и наблюдателей рассмотрим с помощью модели, основанной на данных космического аппарата OTD (Optical Transient Detector) [7]. В этой модели положение и интенсивность источников задаётся на основании карт, полученных в результате космических наблюдений мировых гроз [8]. Малая статистика данных не позволяет получать количественные соотношения между наблюдаемым и расчётным сигналом

шумановского резонанса [7, 9]. Однако данные аппарата ОТД дают качественное представление о распределении и динамике мировой грозовой активности и с этой точки зрения вполне применимы для проверки методики.

На рис. 8 показаны результаты разделения на локальные и универсальные изменения вариаций интенсивности компоненты H_φ , рассчитанные для трёх пар обсерваторий по средним за сентябрь данным аппарата ОТД. Как видим, для данной модели вариации функции $L(t_L)$ имеют более сложный вид. Кроме того, функции $L(t_L)$, полученные по различным парам обсерваторий, сильнее отличаются между собой, чем это наблюдалось для модели одного источника. Тем не менее, и в этом случае функции $U_k(t_U)$ значительно ближе к истинной вариации интенсивности $I_S(t_U)$, чем исходные интенсивности $P_r(t_U)$. Так, отклонение средней универсальной функции $\langle U_k(t_U) \rangle$ от $I_S(t_U)$ не превосходит 15 %, т. е. среднее $\langle U_k(t_U) \rangle$ является вполне удовлетворительной оценкой интенсивности источников. Таким образом, моделирование показало, что применение методики к совместным данным обсерваторий Лехта, Мошири и Вест Гринвич позволяет получать адекватные оценки интенсивности мировых гроз.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведём основные результаты работы.

Проведена обработка записей шумановского резонанса, полученных в результате 2,5-годичного мониторинга, осуществленного одновременно в трёх широко разнесённых обсерваториях — Мошири (Япония), Лехта (Россия) и Вест Гринвич (США).

К данным применена методика разделения временных изменений интенсивности шумановского резонанса на вариации в мировом и местном времени. Показано, что результаты, полученные по трём отдельным парам данных, согласуются между собой, что говорит об устойчивости используемой методики.

С помощью моделирования обоснована допустимость применения методики разделения временных изменений интенсивности шумановского резонанса на вариации в мировом и местном времени к совместным данным обсерваторий Лехта, Мошири и Вест Гринвич. Показано, что универсальные вариации описывают изменения интенсивности мировых гроз.

Авторы благодарят доктора Е. Вильямса (Массачусетский технологический институт, Бостон, США) за предоставленные данные обсерватории Вест Гринвич.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balsler M., Wagner C. A. // J. Geophys. Res. 1962. V. 67. P. 619.
2. Nickolaenko A. P., Hayakawa M. Resonances in the Earth-ionosphere cavity. Kluwer Academic Publishers, 2002.
3. Sentman D. D., Fraser B. J. // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, No. 9. P. 15 973.
4. Pechony O., Price C. // Radio Sci. 2006. V. 41, No.2. Art. no. RS2S05.
5. Nickolaenko A. P., Hayakawa M. // J. Atmos. Electr. 2007. V. 27, No. 2. P. 83.
6. Яцевич Е. И., Швец А. В., Рабинович Л. М и др. // Радиофизика и электроника. Харьков: ИРЭ НАН Украины, 2005. Т. 48, № 4. С. 283.
7. Яцевич Е. И., Николаенко А. П., Печеная О. Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 7. С. 585.
8. Christian H. J., Blaceslee R. J., Voccipio D. J., et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. D1. P. 4005.

9. Nickolaenko A. P., Pechony O., Price C. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. Art. no. D23102.

Поступила в редакцию 28 декабря 2010 г.; принята в печать 21 января 2011 г.

**SCHUMANN-RESONANCE RECORDS AT THREE OBSERVATORIES
AND ULF UNIVERSAL- AND LOCAL-TIME VARIATIONS**

A. P. Nickolaenko, E. I. Yatsevich, A. V. Shvets, M. Hayakawa, and Y. Hobara

We apply a technique separating the universal- and local-time variations of the integrated Schumann-resonance (SR) intensity to the Schumann-resonance data obtained at three observatories, Moshiri (44.365°N, 142.24°E), Lehta (64.427°N, 33.974°E), and West Greenwich (41.6°N, 71.6°W). Feasibility of this technique for compatible data of three observatories was proved by model calculations. It is shown that universal-time variations describe intensity variations of the global thunderstorms.