

## Секция 2: Радиофизические методы диагностики окружающей среды.

### 1. РЕГИОНАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

Ю.В. Ясюкевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН

И.В. Живетьев<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Институт космофизических исследований и распространения радиоволн  
ДВО РАН

А.В. Лухнев<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Институт земной коры СО РАН

*Аннотация.* Большой объем работ, посвященных отклику ионосферы на локальные явления, который появился в последнее время, требует более детального анализа региональных особенностей ионосферы. В настоящей работе с использованием глобальных карт полного электронного содержания проведен анализ регионального электронного содержания (РЭС) в регионе Байкальской рифтовой зоны. Проанализирована динамика РЭС в 1998-2010 гг., а также годовые, полугодовые и 27-дневные вариации. Представлено изменение амплитуды суточных вариаций в 1998-2010 гг., а также зависимость амплитуды суточных вариаций от уровня потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см. Для сравнения приводятся данные по РЭС на аналогичных широтах в Европейской зоне, а также данные глобального электронного содержания.

#### ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера земли является важной частью околоземного космического пространства, состояние которого определяется потоками солнечного излучения на различных длинах волн [1]. В настоящее время мониторинг ионосферы осуществляется различными средствами наземного и спутникового радиозондирования [2, 3]. Развитие спутниковых методов зондирования, а в особенности привлечение для задач радиозондирования спутниковых навигационных систем GPS (Global Position System) и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система), сегодня позволяет осуществлять непрерывный и практически глобальный мониторинг ионосферы Земли [3].

В настоящее время активно ведутся работы по исследованию отклика ионосферы на локальные воздействия (землетрясения, запуски ракет, промышленные взрывы), а также взаимодействие ионосферы с другими геосферами в отдельно взятых регионах. При этом не всегда учитывается общая динамика ионосферы, связанная с особенностями суточных, сезонных, годовых вариаций в заданном регионе. Большой объем работ, посвященных отклику ионосферы на локальные явления требует более детального анализа региональных особенностей регулярной ионосферы, с целью исключения таких особенностей при анализе соответствующих явлений и построении моделей. Для исследования общей динамики ионосферы могут быть использованы глобальные карты полного электронного содержания (ПЭС), алгоритм расчета которых описан в ряде публикаций [4, 5].

Для анализа общей картины по региону мы использовали разработанную в ИСЗФ СО РАН методику расчета глобального и регионального электронного содержания [6], равному полному количеству электронов в ионосфере над рассматриваемой территорией, с ограничением по высоте 20200 км (орбита спутников GPS). Преимуществом такого подхода является то, что в итоге выявляются закономерности, характеризующие динамику электронного содержания в ионосфере по всему рассматриваемому региону. С этой точки зрения экспериментальные значения регионального содержания стоят в одном ряду с величинами концентрации электронов в максимуме слоев E или F2, которые определяются по данным измерений критической частоты на ионосферных станциях.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Метод определения регионального электронного содержания в первую очередь основан на использовании разработанной в нескольких лабораториях (JPLG, США; CODE, Швейцария, и др.) технологии построения глобальных ионосферных карт. Глобальные карты ПЭС (Global Ionospheric Maps – GIM) рассчитываются по данным международной сети приемников GPS в различных научных центрах:

- 1) Geodetic Survey Division of Natural Resources Canada (EMRG) [7],
- 2) Center for Orbit Determination in Europe, University of Berne, Switzerland (CODE) [8],
- 3) Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology (JPLG) [9],
- 4) Grup Universitat Politecnica de Catalunya (UPCG) [10],
- 5) European Space Agency Group (ESAG) и др.

Алгоритмы восстановления пространственно-временного распределения ПЭС, разработанные в упомянутых научных центрах, подробно описаны в ряде публикаций [4, 5]. Несмотря на различие этих алгоритмов, общая концепция восстановления абсолютного вертикального значения ПЭС основана на подборе оптимальных параметров выбранной модели вертикального распределения электронной концентрации с высотой (N(h)-профиля). Для такой модели рассчитываются значения ожидаемой ионосферной поправки к значению дальности до ИСЗ GPS для реальных значений углов зрения на ИСЗ GPS. Затем расчетные значения поправок сравниваются с измеренными, и этот процесс для различных параметров модели N(h)-профиля повторяется до тех пор, пока не будут получены минимальные значения невязок. Далее для оптимального по минимуму невязок N(h)-профиля рассчитывается вертикальное ПЭС, которое по существу равно среднему значению ПЭС для соответствующей GIM-ячейки.

Пространственный диапазон карт GIM, представленных в сети Интернет [10] в стандартном формате IONEX, от 0° до 360° по долготе и от -90° до 90° по широте; размер элементарной ячейки GIM - 5° по долготе и 2.5° по широте. Для каждого момента времени с двухчасовым временным разрешением из файлов IONEX известны значения вертикального ПЭС  $I_{ij}$ , где индексы  $i, j$  отмечают координаты (широту и долготу) ячейки GIM.

Региональное электронное содержание (средневзвешенное полное электронное содержание в регионе, РЭС) вычисляется путем суммирования по всем ячейкам GIM значений ПЭС для каждой ячейки, умноженных на площадь ячейки GIM  $S_{ij}$  [6]

$$\langle I \rangle = \frac{1}{S} \sum_i S_i I_i \quad (1)$$

где  $S$  – полная площадь поверхности,  $S_i$  и  $I_i$  – площадь и ПЭС в  $i$ -ой ячейке GIM. Произведение  $S_i \cdot I_i$  представляет собой полное число электронов в ячейке GIM. В ряде работ (см. например, [11]) среднее ПЭС считается как среднеарифметическое по всем

значениям ПЭС. Отбрасывание статистического весового множителя возможно, но является менее точным, по сравнению с применяемым нами подходом.

В более ранних работах по динамике глобального и регионального электронного содержания рассчитывалось общее число электронов и нормировка на площадь Земли не делалась. Здесь мы провели такую нормировку для того, чтобы в дальнейшем иметь возможность сравнить эти данные с данными других средств расположенных в регионе.

В настоящей работе мы рассчитали региональное электронное содержание для территории Байкальской рифтовой зоны (БРЗ - 50-55° С.Ш., 105-110° В.Д.) на основе карт GIM лаборатории CODE [8]. Для сравнения мы даем анализ РЭС для аналогичного широтного региона в Европе (50-55° С.Ш., 15-20° В.Д.) а также средневзвешенное ПЭС по всему миру (глобальное электронное содержание, ГЭС).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлена динамика РЭС в регионах БРЗ и Европы, а также ГЭС в 1998-2010 гг. Черной кривой приведены данные для РЭС в БРЗ, красной – для Европейского региона, синей – глобальное электронное содержание. На панели *а)* эти данные сглажены с окном 10 дней для удаления суточных вариаций, на панели *б)* – с окном 81 для удаления суточных и 27-дневных вариаций, на панели *в)* – с окном 365 дней для выделения общей 11-летней динамики.

Значительный «шум» в данных, представленных на панели *а)*, обусловлен 27-дневными вариациями. В динамике хорошо прослеживаются как годовые и полугодовые вариации, так и общий 11-летний ход, характеризующий цикл солнечной активности с максимумом в 2002 г. Общая динамика РЭС и ГЭС, представленная на рис. 1 в достаточно полно отражает динамику уровня солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см (серые точки) с максимумами в 2002 г. и 2000 г., локальным минимумом в 2001 г. и значительным уменьшением после 2002 г. Значения РЭС в БРЗ меняются в достаточно широком диапазоне – от 3 до 47 TECU (Total electron content unit,  $10^{16}$  эл./м<sup>2</sup>). Максимальные значения наблюдаются в зимний период 2002 г., соотносясь с максимальным значением индекса  $F_{10.7}$ .

Как видно из рис. 1, ГЭС превышает значения РЭС в регионах Европы и БРЗ. Данный факт в целом достаточно очевиден, т.к. в ГЭС вносят вклад приэкваториальные области в которых имеет место более высокие значения ПЭС. Из рис. 1 в хорошо видно, что РЭС в целом немного выше, чем в аналогичном широтном регионе в Европе. При высоком уровне солнечной активности разница между ними составляет ~6-8 TECU, а при низком уровне (2008-2009 гг.) уменьшается и становится практически нулевой.

На рис. 1б можно видеть хорошо выраженные годовые и полугодовые вариации. На рис. 2 эти вариации представлены соответственно на панели *а)* и *б)*. Для расчета вариаций использовался фильтр Баттерворда с границами 200-500 дней (для годовых вариаций) и 100-300 дней (для полугодовых вариаций).

Величина годовых вариаций (рис. 2а) РЭС в регионах Европы и БРЗ практически одинакова. На подъеме, спаде и в минимуме солнечной активности (1999, 2003-2010 гг.) максимум суточных вариаций РЭС в БРЗ наблюдается в летние месяцы, в районе летнего солнцестояния. Амплитуда годовых вариаций ~3 TECU постепенно уменьшается с уменьшением уровня солнечной активности до 1.5 TECU в 2009 г.

В 2000-2002 гг. максимум годовых вариаций значительно смещен относительно летних месяцев. В 2002 г. в летние месяцы наблюдается минимум годовых вариаций

РЭС. В 2000 г. и 2001 г. максимум годовых вариаций РЭС наблюдается в весенние месяцы. Амплитуда годовых вариаций РЭС в БРЗ в 2000 г. составляет  $\sim 7$  TECU.

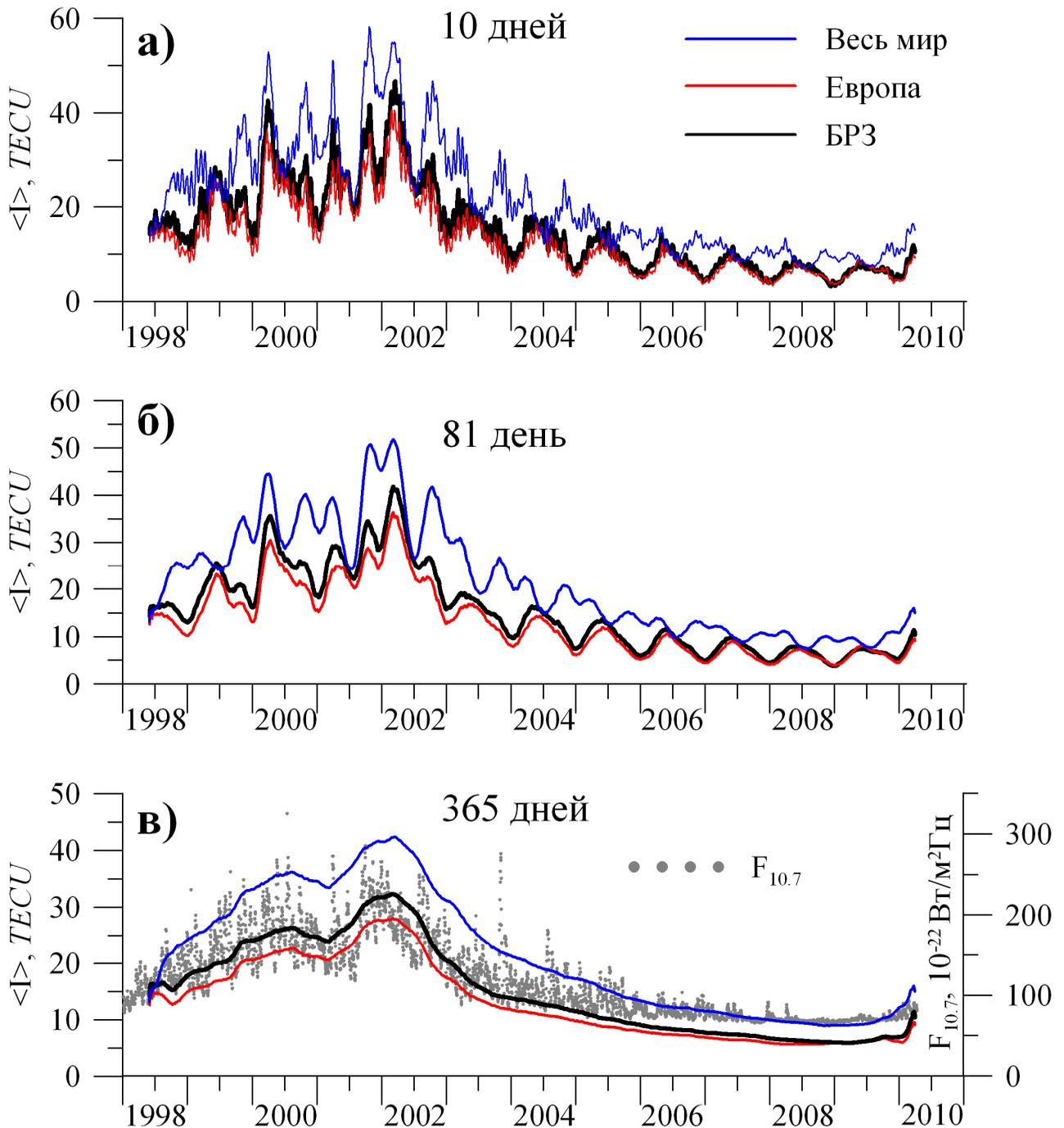


Рис. 1. Динамика регионального электронного содержания в БРЗ (черная кривая), Европейском регионе (красная кривая) и глобального электронного содержания (синяя кривая) в 23-м цикле солнечной активности. Серыми точками на панели в) приведены данные потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см

Как можно видеть из рис. 2а, годовые вариации РЭС в БРЗ и годовые вариации ГЭС сдвинуты по фазе. Максимум годовых вариаций ГЭС приходится на зимние месяцы. Это означает, что южное полушарие вносит гораздо более существенный вклад в годовые вариации. Амплитуда годовых вариаций ГЭС в максимуме солнечной

активности больше, чем амплитуда вариаций РЭС, но после прохождения максимума солнечной активности ситуация меняется и, начиная с 2003 г., амплитуда годовых вариаций РЭС становится более существенной.

Амплитуда полугодовых вариаций РЭС (рис. 2б) имеет наибольшие значения в максимуме солнечной активности и резко уменьшается в минимуме солнечной активности. Стоит отметить сфазированность полугодовых вариации РЭС и ГЭС. Максимум полугодовых вариаций приходится на равноденствие, минимум – на солнцестояние. В 2000 г. амплитуда полугодовых вариаций РЭС в БРЗ составляет ~9.5 TECU, в 2002 - ~8.5 TECU, а после 2004 г. не превышает 2 TECU. Амплитуда годовых вариаций ГЭС превышает амплитуду годовых вариаций РЭС в БРЗ. В 2000 г. значение амплитуды вариаций ГЭС ~12 TECU, а после 2004 г. не превышает 3 TECU.

На рис. 3а представлены 27-дневные вариации РЭС в БРЗ. Синей кривой отмечена огибающая 27-дневных вариаций. На рис. 3б даны огибающие 27-дневных вариаций ГЭС (синяя кривая) и РЭС в регионах Европы (красная кривая) и БРЗ (черная кривая). Можно видеть, что амплитуда 27-дневных вариаций промодулирована. Основным периодом модуляции – полгода, хотя имеют место и более высокочастотные гармоники. В периоды солнцестояния мы видим минимум амплитуды вариаций, в периоды равноденствия – минимум амплитуды вариаций. Наибольшая амплитуда вариаций имеет место в 2000 г. и достигает 6 TECU. В минимуме солнечной активности 0.5-3 TECU.

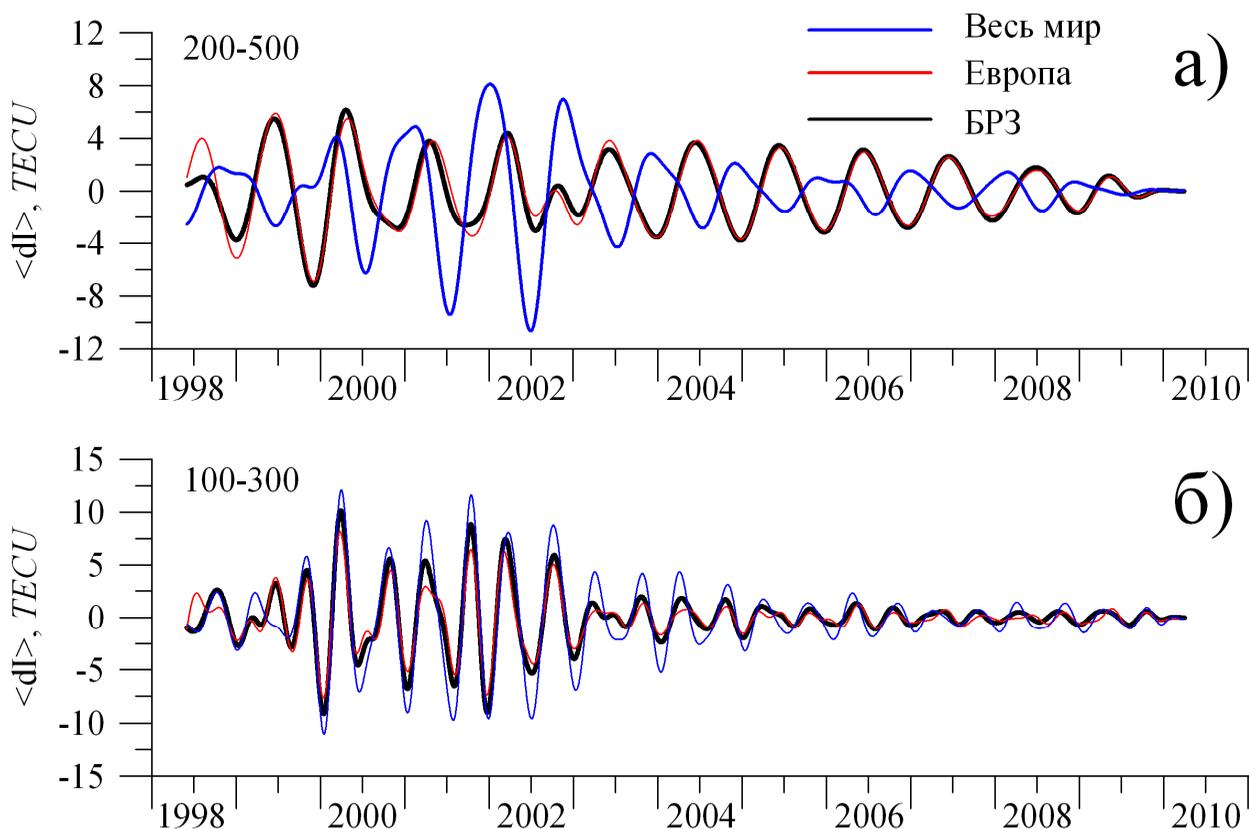


Рис. 2. Годовые (а) и полугодовые (б) вариации регионального электронного содержания в Байкальском (черная кривая) и Европейском (красная кривая) регионе и глобального электронного содержания (синяя кривая)

Амплитуда 27-дневных вариаций (рис. 3б) ГЭС в 1998-1999 гг. и 2003-2005 гг. превосходит амплитуду 27-дневных вариаций РЭС в БРЗ. Начиная с 2003 г. вариации

РЭС в Европейском регионе более выражены, чем в регионе БРЗ, хотя за исключением 2003 г. это отличие не существенное. Можно видеть, что наиболее существенно 27-дневные вариации выражены на подъеме и спаде солнечной активности, что согласуется с результатами [12].

Для анализа суточных вариаций РЭС мы рассчитали амплитуду вариаций. В данном случае в качестве амплитуды мы взяли разницу между максимальным и минимальным значением за текущий день года. Динамика амплитуды РЭС представлена на рис. 4. Черная кривая – амплитуда суточных вариаций РЭС в БРЗ, синяя кривая – амплитуда вариаций ГЭС, красная кривая – РЭС в Европейском регионе.

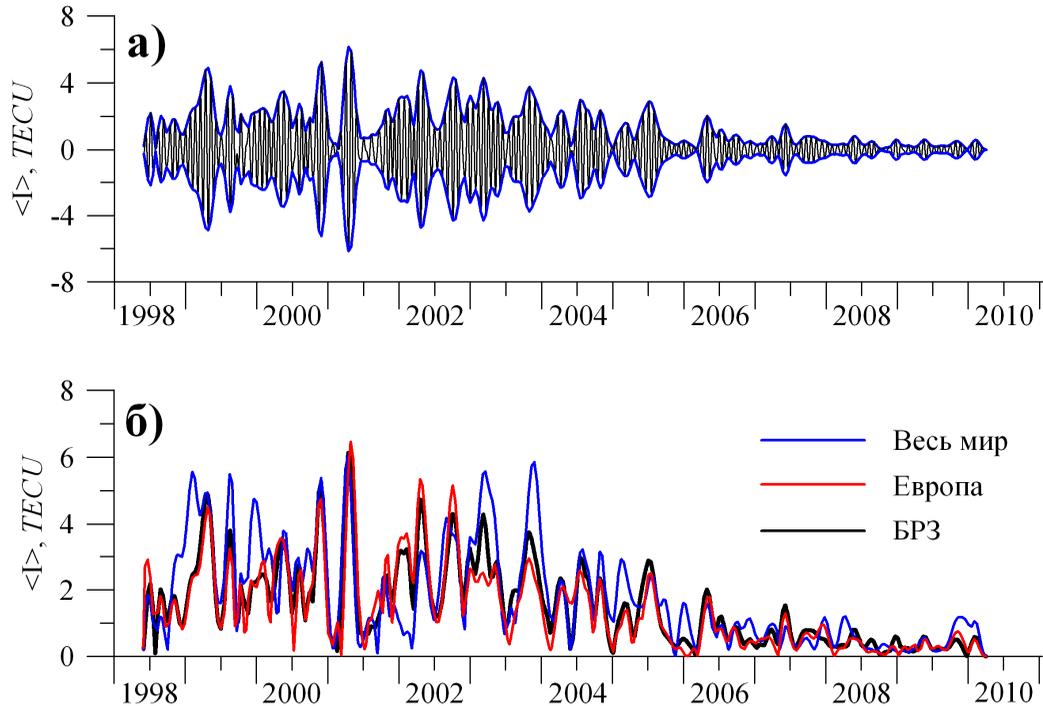


Рис. 3. 27-дневные вариации РЭС в БРЗ (а) и огибающая 27-дневных вариаций в различных регионах (б)

Амплитуда суточных вариаций РЭС промодулирована годовой и 11-летней гармоникой и в меньшей степени полугодовой, в отличие от 27-дневных вариаций (см. рис. 3б), в которых также присутствует 11-летняя гармоника, но основной является полугодовая. Рис. 4. очень близок к рис. 1а. Значения амплитуды ГЭС в целом превышают соответствующие значения РЭС в БРЗ за исключением зимних периодов 2000-2001 гг., где эти величины были сравнимы. В январе 2002 г. значения амплитуды суточных вариаций РЭС в БРЗ достигали 75 TECU. В 2004-2010 гг. эти значения лежали в диапазоне 1.5-30 TECU. Для сравнения амплитуда суточных вариаций ГЭС в этот период находилась в диапазоне 7-41 TECU, а РЭС в Европейском регионе 3-32 TECU. Стоит отметить, что в летние месяцы амплитуда суточных вариаций РЭС в БРЗ увеличивается и становится больше, чем амплитуда вариаций ГЭС.

В [12] было показано, что величина ГЭС нелинейно зависит от уровня солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см. С этой точки зрения представляет интерес проанализировать аналогичную зависимость амплитуды суточных вариаций РЭС и ГЭС. На рис. 5 представлена зависимость амплитуды суточных вариаций РЭС в регионах БРЗ (панель а) и Европы (панель б) и ГЭС (панель в) от индекса  $F_{10.7}$ . Для БРЗ (рис. 5а) эта зависимость близка к линейной с увеличением среднеквадратичного отклонения при увеличении значения индекса  $F_{10.7}$ . Красной кривой нанесена

аппроксимация полиномом второй степени. Уравнение аппроксимирующей кривой дано в верхнем левом углу панели. Коэффициент при квадратичном члене составляет 0.0001. Для РЭС в Европейском регионе его значение 0.0003, а для ГЭС – 0.0009 и, как можно видеть, имеет место эффект насыщения.

На рис. 6а и рис. 6б приведена динамика дневного (12-13 LT) и ночного (0-1 LT) РЭС, соответственно. Ряды данных были усреднены с окном 3 дня для нивелирования экстремальных событий. Черная кривая – для БРЗ, красная кривая – для Европейской части. Первое, что можно видеть – высокие ночные значения РЭС в БРЗ ночью. Это особенно существенно в годы низкой солнечной активности, когда дневные значения РЭС становятся достаточно низкими. Суточный ход при этом может стать существенно аномальным и дневные значения оказаться ниже ночных.

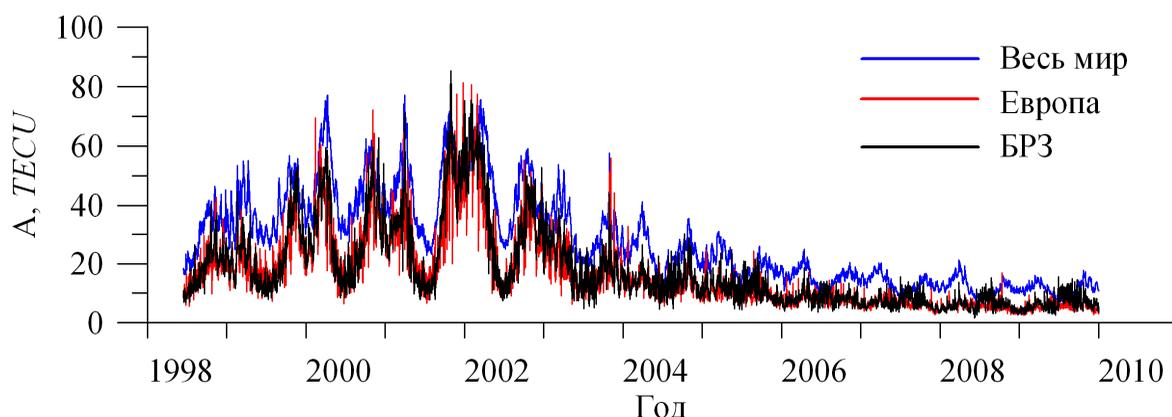


Рис. 4. Амплитуда суточных вариаций РЭС в регионах Европы (красная кривая) и БРЗ (черная кривая) и ГЭС (синяя кривая)

Величина дневных значений РЭС в регионах Европы и БРЗ за исключением летних месяцев 2004-2010 гг. достаточно близка. Величина же ночных значений РЭС в БРЗ существенно выше. Это особенно выражено в летние месяцы, в которые дневные значения наоборот становятся меньше.

Для анализа нарушения суточного хода возможно использовать соотношение дневной и ночной ионизации, характеризующее суточную динамику ПЭС в исследуемом регионе. Для этих целей мы рассчитали величину  $R$ , представляющую собой отношение дневного значения РЭС к ночному

$$R = I_{13} / I_1 \quad (2)$$

где  $I_{13}$ ,  $I_1$  – среднее региональное ПЭС для 12-13 LT и 0-1 LT, соответственно.

При высокой солнечной активности в отдельные зимние дни величина  $R$  для БРЗ достигает 8 (рис. 6в). Достаточно интересен факт, что начиная с 2004 г., т.е. в минимуме солнечной активности, значения  $R$  в БРЗ летом становятся меньше единицы. Что говорит о существенном нарушении суточного хода в данном регионе летом.

Как можно видеть, значение  $R$  для Европейской части близко к 2 и достаточно слабо меняется в минимуме солнечной активности. В БРЗ можно видеть существенную динамику соотношения дневной и ночной ионизации. Величина  $R$  меняется от 0.25 до 6.

Таким образом, можно сказать, что суточный ход ПЭС в регионе БРЗ достаточно сильно отличается от суточного хода на аналогичных широтах в Европейском регионе. И даже более того, суточный ход ионизации существенно отличается от «классической» динамики ПЭС, соответствующей модели Чепмена. Согласно модели Чепмена большему зенитному углу солнца соответствует большее значение

электронной концентрации (а, следовательно, ПЭС). В исследуемом регионе мы наблюдаем картину, когда ночные значения ПЭС превосходят дневные.

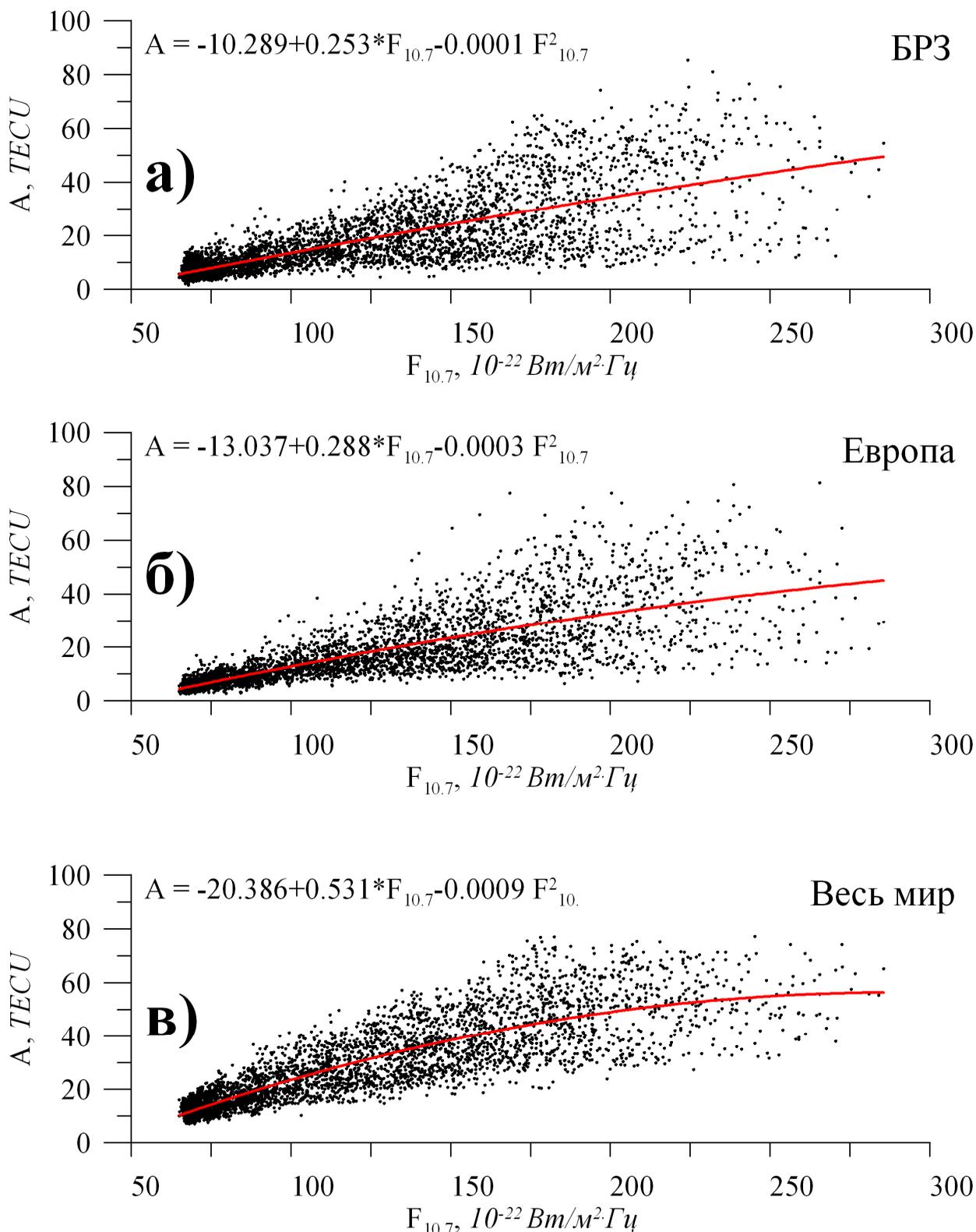


Рис. 5. Зависимость амплитуды суточных вариаций ПЭС в регионах БРЗ (а) и Европы (б) и ГЭС (в) от уровня солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см

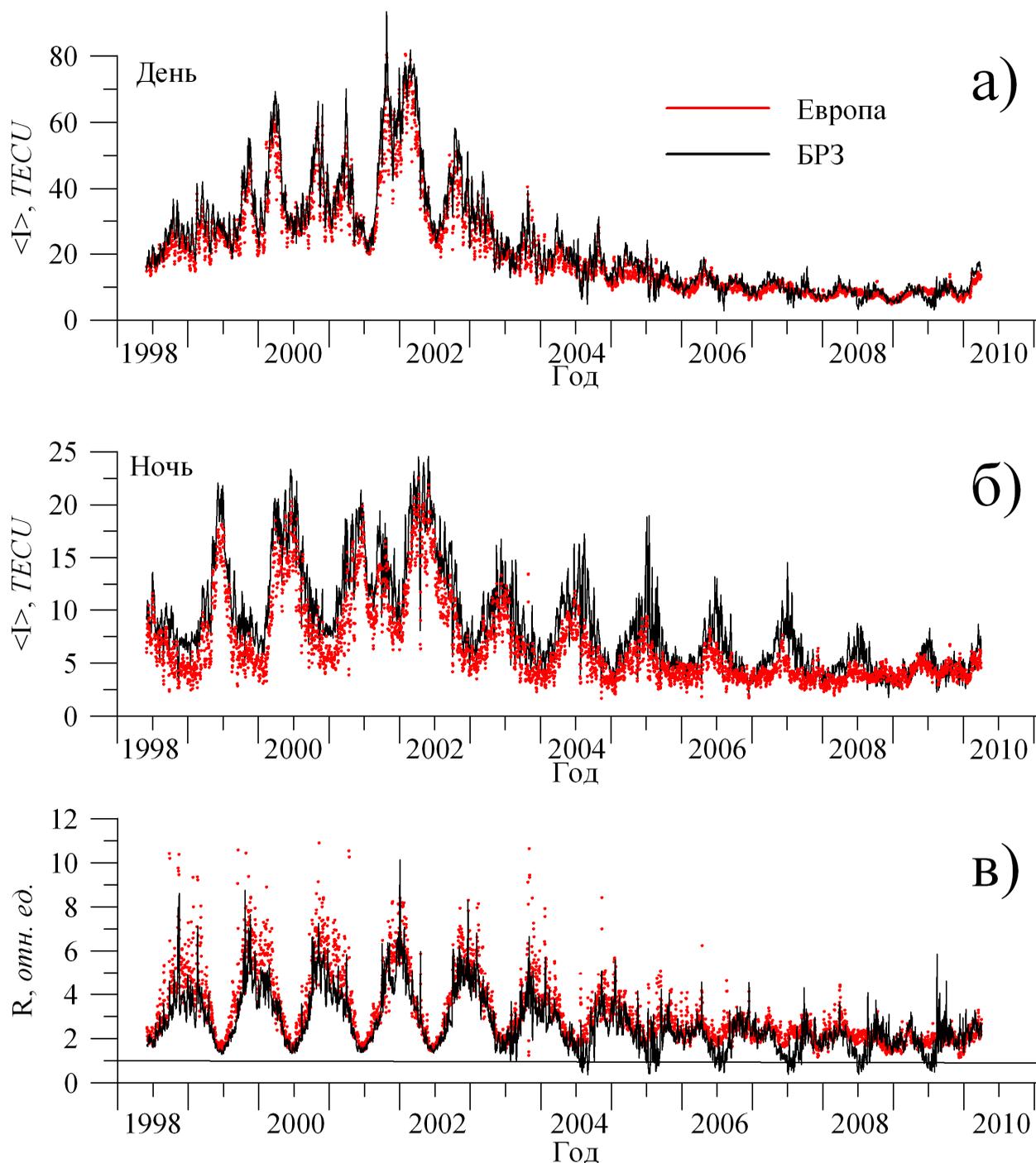


Рис. 6. Дневные (а) и ночные (б) значения РЭС в регионах БРЗ и Европы. На панели в) приведено отношение дневного РЭС к ночному.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что в целом динамика регионального электронного содержания в Байкальской рифтовой зоне достаточно хорошо соотносится с динамикой РЭС в аналогичном Европейском регионе. Это же верно и для годовых, полугодовых и 27-дневных вариаций РЭС. Такое согласование можно использовать при исследовании нарушения «правильности» хода локального РЭС в БРЗ, анализируя соответствующую динамику в Европейском регионе. С глобальным

содержанием такое сравнение провести не всегда возможно. Так как годовые вариации в гораздо большей степени выражены в южном полушарии и имеет место разная фаза годовых вариаций ГЭС и РЭС в северном полушарии, то можно увидеть кажущееся нарушение динамики РЭС в БРЗ относительно ГЭС.

Было установлено, что имеет место существенное нарушение суточного хода РЭС в БРЗ в летние месяцы на спаде солнечной активности и особенно в минимуме активности, когда ночные значения РЭС становятся больше дневных. Данное явление требует дальнейшего анализа.

Установлено, что зависимость амплитуды суточных вариаций РЭС от индекса  $F_{10.7}$  достаточно близка к линейной, чего нельзя сказать об аналогичной зависимости для глобального электронного содержания. Данный факт может быть связан с тем, что амплитуда суточных вариаций в регионах экваториальной аномалии, вносящих значительный статистических вклад в ГЭС, имеет существенно нелинейную зависимость от уровня солнечного излучения.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность С.В. Воейкову за ценные замечания при подготовке работы и помощь в обработке данных. Работа выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 56, гранта РФФИ 10-05-00113-а и гранта президента РФ МК-3094.2010.5..

### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М. Солнце и ионосфера. Наука. Москва. 1969. - 456 с.
2. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. Наука. М. 1988. - 499 с.
3. Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли // Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. - 480 с.
4. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.M., Lindqwister U.J., Runge T.F. A global mapping technique for GPS derived ionosphere TEC measurements // Radio Sci. V. 33, N 3. P. 565–582. 1998.
5. Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere // Proceedings of the IGS AC Workshop. Darmstadt, Germany. February 9-11. P. 307-320. 1998.
6. Афраимович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. Солнечная активность и глобальное электронное содержание // ДАН. Т. 409, N3. С. 399-402. 2006.
7. <http://www.nrcan-rncan.gc.ca/>
8. <http://www.cx.unibe.ch/>
9. <http://www.jpl.nasa.gov/>
10. <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>
11. Hocke K. Oscillations of global mean TEC // Journal of geophysical research. V. 113. A04302. doi:10.1029/2007JA012798. 2008.
12. Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., Yasukevich Yu.V., Zhivetiev I. V. Global Electron Content: a new conception to track solar activity // Annales Geophysicae. V. 26. P. 335-344. 2008.