

ПРОСТРАНСТВО, ВРЕМЯ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

научный журнал

Учредитель

ООО « ПРОФИЛЬ - 2С »

Издатель

ООО « ПРОФИЛЬ - 2С »

123060, Москва, 1-ый Волоколамский проезд, д. 15/16

тел/факс +7 (499) 196 18 49

e-mail: profill@profill.ru

сайт: www.profill.ru

Главный редактор

А. М. Баранов — профессор, доктор физ.-мат. наук, РОССИЯ, Красноярск

Шеф-редактор

Е. В. Савельев — кандидат физ.-мат. наук, РОССИЯ, Москва

Заместители главного редактора

Ю. Г. Игнатьев — профессор, доктор физико-математических наук, РОССИЯ, Казань

С. В. Сушков — профессор, доктор физико-математических наук, РОССИЯ, Казань

Редакционная коллегия

А. В. Аминова — профессор, доктор физ.-мат. наук, РОССИЯ, Казань

В. Г. Багров — профессор, доктор физ.-мат. наук, РОССИЯ, Томск

А. Б. Балакин — профессор, доктор физ.-мат. наук, РОССИЯ, Казань

Ю. С. Владимиров — профессор, доктор физ.-мат. наук, РОССИЯ, Москва

В. Д. Гладуш — профессор, доктор физ.-мат. наук, УКРАИНА, Днепрпетровск

А. К. Горбачевич — профессор, доктор физ.-мат. наук, БЕЛОРУСЬ, Минск

А. П. Ефремов — профессор, доктор физ.-мат. наук, РОССИЯ, Москва

В. М. Журавлев — профессор, доктор физ.-мат. наук, РОССИЯ, Ульяновск

М. П. Коркина — профессор, доктор физ.-мат. наук, УКРАИНА, Днепрпетровск

В. Н. Мельников — профессор, доктор физ.-мат. наук, РОССИЯ, Москва

А. В. Минкевич — профессор, доктор физ.-мат. наук, БЕЛОРУСЬ, Минск

Н. В. Мицкевич — профессор, доктор физ.-мат. наук, МЕКСИКА, Гвадалахара

И. С. Нургалиев — профессор, кандидат физ.-мат. наук, РОССИЯ, Москва

С. В. Червон — профессор, доктор физ.-мат. наук, РОССИЯ, Ульяновск

Э. Шмутцер — профессор, ГЕРМАНИЯ, Йена

Адрес редакции:

123060, РОССИЯ, г. Москва, 1-ый Волоколамский проезд, д. 15/16

тел/факс +7 (499) 196 18 49

e-mail: info@stfi.ru

сайт: www.stfi.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77 - 50013 от 24 мая 2012 года

Подписной индекс 90995 в Объединенном каталоге «Пресса России»

ISSN 2226-8812

SPACE, TIME AND FUNDAMENTAL INTERACTIONS

scientific journal

Founder

ООО «PROFILL - 2S»

Publisher

ООО «PROFILL - 2S»

123060, Moscow, 1 Volokolamsky passage, 15/16

fone/fax +7 (499) 196 18 49

e-mail: profill@profill.ru

www: www.profill.ru

Editor-in-chief

Alexander Baranov — Professor, RUSSIA, Krasnoyarsk

Managing editor

Eugene Savelyev — RUSSIA, Moscow

Deputy Editors-in-Chief

Yu. G. Ignatyev — Professor, RUSSIA, Kazan

S. V. Sushkov — Professor, PhD, RUSSIA, Kazan

Editorial Board

A. Aminova — Professor, RUSSIA, Kazan

V. Bagrov — Professor, RUSSIA, Tomsk

A. Balakin — Professor, RUSSIA, Kazan

S. Chervon — Professor, RUSSIA, Ulianovsk

V. Gladush — Professor, UKRAINE, Dnepropetrovsk

A. Gorbatsievich — Professor, BELARUS, Minsk

M. Korkina — Professor, UKRAINE, Dnepropetrovsk

V. Melnikov — Professor, RUSSIA, Moscow

A. Minkevich — Professor, BELARUS, Minsk

N. Mitskievich — Professor, MEXICO, Guadalajara

I. Nurgaliev — Professor, PhD, RUSSIA, Moscow

E. Schmutzer — Professor, GERMANY, Jena

Yu. Vladimirov — Professor, RUSSIA, Moscow

A. Yefremov — Professor, RUSSIA, Moscow

V. Zhuravlev — Professor, RUSSIA, Ulyanovsk

Address:

123060, RUSSIA, Moscow, 1 Volokolamsky passage, 15/16

fone/fax +7 (499) 196 18 49

e-mail: info@stfi.ru

www: www.stfi.ru

The certificate on registration of mass media

ПН № ФС77 - 50013 from 24 May 2012

Subscription index 90995 in the incorporated catalogue «Press of RUSSIA»

ISSN 2226-8812

СОДЕРЖАНИЕ

К. В. Иванов ВЫСОКОТОЧНАЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ МИРА В СООТНОШЕНИЯХ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ ПОСТОЯННЫМИ	5
А. М. Баранов, Е. В. Савельев ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ КОНФОРМНО-ПЛОСКОЙ ВСЕЛЕННОЙ. II. ЛИНЕЙНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И МНОГОМЕРНЫЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНА	19
А. Б. Балакин, Л. В. Грунская ПРЕДИСЛОВИЕ: АКСИОННАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ	31
Л. В. Грунская, В. А. Ефимов, А. А. Закиров, А. Н. Золотов, Д. В. Рубай, И. А. Лещёв МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ	32
В. В. Исакевич, Л. В. Грунская, Д. В. Исакевич ВЫЯВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНО ЛОКАЛИЗОВАННЫХ КОМПОНЕНТ НА ЧАСТОТАХ ЛУННЫХ ПРИЛИВОВ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ	43
Л. В. Грунская, В. В. Исакевич, Д. В. Исакевич, Л. Т. Сушкова ВЫЯВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНО ЛОКАЛИЗОВАННЫХ КОМПОНЕНТ НА ЧАСТОТАХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ	54
А. Б. Балакин АКСИОННАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ: ПОИСК СИГНАЛОВ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ	72

CONTENTS

K. V. Ivankov	
High-precision fundamental symmetry of the universe in relations between the physical constants	5
A. M. Baranov, Eu. V. Saveljev	
Exact solutions of the conformally flat Universe. II. The linear equation of state and multidimensional space-times	19
A. B. Balakin , L. V. Grunskaya	
Introduction: Axion electrodynamics and gravitational phenomena in the Earth atmosphere	31
L. V. Grunskaya, V. A. Efimov, A. A. Zakirov, A. N. Zolotov, D. V. Rubai, I. A. Leschew	
Infralow frequency electromagnetic fields monitoring	32
V. V. Isakevich, L. V. Grunskaya, D. V. Isakevich	
Detection of Earth electric field components spectrally localized on frequencies of the Lunar tides	43
L. V. Grunskaya, V. V. Isakevich, D. V. Isakevich, L. T. Sushkova	
Detection of Earth electric field components spectrally localized on frequencies of the astrophysical processes	54
A. B. Balakin	
Axion electrodynamics of the Earth atmosphere: Search for signals induced by gravitational waves	72

УДК 530.1; 53.02

*К. В. Иванков*¹**ВЫСОКОТОЧНАЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ МИРА
В СООТНОШЕНИЯХ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ ПОСТОЯННЫМИ**

Найдена высокоточная фундаментальная симметрия мира, базирующаяся на двух известных соотношениях между физическими постоянными — *большими числами*. Симметрия проявляется в соотношениях между физическими постоянными атомного и космологического уровней.

Определена универсальная аналитическая связь между целым рядом фундаментальных физических постоянных. Создана система физических постоянных, в которой число независимых постоянных равно двум. В этой системе все фундаментальные не ядерные физические постоянные оказались представимы в виде:

$$AnyConst = K^m K_p^n,$$

где K и K_p — известные большие числа, а m и n — небольшие целые числа.

Результат получен с точностью на уровне точности постоянных CODATA за 2010 год, а также — в дополнительном исследовании — подтверждён с относительной точностью не хуже 10^{-15} и представлен в виде аналитических выражений, численных значений и таблиц.

Ключевые слова: фундаментальная симметрия, связь между физическими постоянными, универсальная формула для физических постоянных, большие числа.

PACS: 12.60.-i; 12.60.Jv; 12.90.+b

Введение

С тех пор, как учёные заметили существование так называемых больших чисел, встречающихся в различных соотношениях между атомными и космологическими постоянными, прошло более века. Однако, ни одна из многочисленных работ, затрагивающих тему больших чисел, не привела к открытию такой неуловимой, интуитивно ожидаемой, достаточно точной фундаментальной симметрии, лежащей в основе мира, и проявлением которой является существование некоторых больших чисел.

Как известно, основная проблема, связанная с большими числами, заключалась в том, что ни в одной математической теории не появляются такие огромные числа в качестве неких решений. Как будет видно далее, без внимания была оставлена математическая инверсия. Очевидно, по той причине, что радиус мира, который она предсказывала, не вписывался ни в одну теорию и не подтверждался наблюдениями. Не вписывается он и сейчас. Однако, появились аргументы, которые могут изменить отношение к теории инверсии как основе мира.

Наиболее известным решением проблемы наличия больших чисел, названных его именем, стала предложенная П.А.М. Дираком в 1937 году связь между большими числами и космологическим временем, выраженным в атомных единицах. Дирак выдвинул гипотезу, согласно которой все большие числа связаны со временем существования вселенной и, следовательно, изменяются вместе с ним. Это полностью совпало с концепцией нестационарной вселенной, предложенной А. Фридманом и развиваемой рядом других учёных, что укрепило весомость обеих этих гипотез.

Почти все прошедшие с тех пор годы гипотеза П.А.М. Дирака об изменяющихся со временем физических постоянных активно развивалась, многократно проверялась, но её окончательное подтверждение ускользало. В последнее же время накопилось достаточное количество высокоточных данных, из которых следует, что считать физические постоянные изменяющимися преждевременно [1].

Фундаментальная симметрия мира, выполняющаяся с высочайшей точностью, наконец найдена и подтверждена в известных соотношениях между физическими постоянными.

¹ E-mail: kivankov@gmail.com; <http://kivankov.ru>

1. Предположения

Фундаментальная симметрия мира проявляет себя в соотношениях между физическими постоянными и становится ясно видимой, если сделать три простых предположения:

Предположение 1 Верна гипотеза, высказанная Г. Вейлем в 1919 году [2], согласно которой:

$$R/r_e = r_e/r_g, \quad (1.1)$$

где R — радиус мира, r_e — классический радиус электрона, r_g — гравитационный радиус электрона.

Предположение 2 Гравитационный радиус рассчитывается по формуле:

$$R_g = \frac{Gm}{c^2}, \quad (1.2)$$

где R_g — гравитационный радиус, G — гравитационная постоянная, m — масса тела, c — скорость света.

Предположение 3 Радиус мира равен его гравитационному радиусу:

$$R = R_g. \quad (1.3)$$

2. Фундаментальный коэффициент

В формуле (1.1) и слева, и справа — одно и то же число:

$$R/r_e = r_e/r_g = K, \quad (2.1)$$

где K — коэффициент, который мы назовём *фундаментальным*:

$$K = \frac{r_e c^2}{Gm_e} = 4,16589(50) \cdot 10^{42}. \quad (2.2)$$

Фундаментальный коэффициент K — одно из больших чисел Дирака и численно равен отношению электрической / магнитной силы к гравитационной. Ниже будет показано, в каких ещё соотношениях он проявляется.

3. Планковские величины и планковский коэффициент

Во время построения таблиц, визуализирующих симметрию мира, выяснилось, что для её завершения не хватает двух планковских величин, которые мы здесь введём сразу, чтобы подойти к демонстрации результатов в полной готовности.

В связи с определением гравитационного радиуса по формуле (1.2), можно заметить, что планковская длина l_P приобретает смысл этого радиуса — гравитационного радиуса планковской массы M_P :

$$r_g^P = \frac{GM_P}{c^2} = 1,61619(29) \cdot 10^{-35} = l_P, \quad (3.1)$$

где r_g^P — гравитационный радиус планковского экземпляра, численно равный планковской длине l_P .

Любая частица, которой присущи атрибуты: масса, гравитационный радиус и заряд, имеет не только гравитационный радиус, но и обычный радиус.

Верно и другое: если нечто имеет массу, гравитационный радиус и заряд, то это нечто условно может считаться частицей, поскольку ей присущи ключевые характеристики частицы.

Таким образом, пусть и гипотетическая, планковская частица (*планковский экземпляр*) в дополнение к массе, гравитационному радиусу и заряду должна иметь и обычный радиус, характеризующий эту самую частицу. В том числе потому, что гравитационный радиус частицы существует не сам по себе, а как радиальный эквивалент её массы. Масса же частицы не содержится в гравитационном радиусе. Она связана с её обычным радиусом, который для планковского экземпляра до сих пор не был определён, поскольку такой задачи не стояло.

Поскольку M_P во много раз больше m_e , то условно можно считать, что в планковском экземпляре содержится некоторое количество *элементарных экземпляров* (электронов). Тогда число элементарных экземпляров в планковском экземпляре может быть выражено через отношение планковской массы и массы электрона:

$$N_{e/P} = M_P/m_e = 2,38930(14) \cdot 10^{22} = K_P, \quad (3.2)$$

где $N_{e/P}$ — число элементарных экземпляров в планковском экземпляре, M_P — планковская масса, m_e — масса электрона, K_P — коэффициент пропорциональности в соотношениях планковских величин и соответствующих величин электрона. Назовём этот коэффициент *планковским*. Планковский коэффициент может быть выражен через отношение гравитационного радиуса планковского экземпляра (планковской длины) к гравитационному радиусу электрона:

$$r_g^P/r_g = l_P/r_g = K_P. \quad (3.3)$$

Можно предположить, что этим же коэффициентом могут быть связаны и отношения радиусов: планковского, который мы ищем, и классического радиуса электрона:

$$r_P/r_e = K_P, \quad (3.4)$$

где r_P — *радиус планковского экземпляра*, r_e — классический радиус электрона. Откуда:

$$r_P = r_e K_P = 6,73290(40) \cdot 10^7 \text{ м}. \quad (3.5)$$

Далее, согласно (2.1) отношение классического радиуса электрона к его же гравитационному радиусу:

$$r_e/r_g = 4,16589(50) \cdot 10^{42} = K. \quad (3.6)$$

По аналогии можно предположить, что отношение радиуса планковского экземпляра к планковской длине, численно равной, как мы выяснили ранее, гравитационному радиусу планковского экземпляра, также равно K . Тогда:

$$r_P = K l_P = 6,73290(81) \cdot 10^7 \text{ м}. \quad (3.7)$$

Полученные с помощью двух независимых симметрий, (3.5) и (3.7), значения радиуса планковского экземпляра оказались одинаковы, что с определённой вероятностью говорит о том, что высказанные нами ранее соображения относительно существования и величины радиуса планковского экземпляра верны.

Далее, планковский заряд по величине примерно в 11,7 раз больше элементарного заряда и связан с планковской длиной l_P . Заряд же планковского экземпляра должен быть связан с радиусом планковского экземпляра r_P . Подставив в формулу для элементарного заряда параметры планковского экземпляра, можно найти заряд планковского экземпляра, связанный с радиусом планковского экземпляра r_P :

$$Q_P = \sqrt{4\pi\epsilon_0 c^2 M_P r_P} = 3,82809(23) \cdot 10^3 \text{ Кл}. \quad (3.8)$$

Заряд планковского экземпляра Q_P в K_P раз больше элементарного заряда e . Именно этим коэффициентом связаны между собой все величины элементарного экземпляра и величины на основе планковского экземпляра: масса, гравитационный радиус, радиус экземпляра и заряд:

$$M_P = m_e K_P \quad (3.9)$$

$$l_P = r_g K_P \quad (3.10)$$

$$r_P = r_e K_P \quad (3.11)$$

$$Q_P = e K_P. \quad (3.12)$$

Таблица 1. Фундаментальные физические постоянные, участвующие в симметрии, СИ

Наименование	Обозначение	Значение
Классический радиус электрона, м	r_e	$2,8179403267(27) \cdot 10^{-15}$
Элементарный заряд, Кл	e	$1,602176565(35) \cdot 10^{-19}$
Масса электрона, кг	m_e	$9,10938291(40) \cdot 10^{-31}$
Гравитационный радиус электрона, м	r_g	$6,76431(81) \cdot 10^{-58}$
Радиус планковского экземпляра, м	r_P	$6,73290(40) \cdot 10^7$
Заряд планковского экземпляра, Кл	Q_P	$3,82809(23) \cdot 10^3$
Планковская масса, кг	M_P	$2,17650925(13) \cdot 10^{-8}$
Планковская длина, м	l_P	$1,61619(29) \cdot 10^{-35}$
Радиус мира, м	R	$1,17392(14) \cdot 10^{28}$
Масса мира, кг	M	$1,58090(38) \cdot 10^{55}$

Таким образом, мы не только обнаружили существование ещё одной планковской величины — радиуса планковского экземпляра r_P , нашли соответствующую ему величину заряда Q_P , но и выявили полную симметрию между всеми планковскими и элементарными величинами через планковский коэффициент K_P . При этом планковский экземпляр оказывается во всём подобен элементарному экземпляру.

Найденная симметрия позволяет записать для планковского экземпляра формулы, аналогичные формулам, связывающим соответствующие параметры электрона:

$$m_e = e^2 / (4\pi\epsilon_0 c^2 r_e) \quad M_P = Q_P^2 / (4\pi\epsilon_0 c^2 r_P) \quad (3.13)$$

$$r_e = e^2 / (4\pi\epsilon_0 c^2 m_e) \quad r_P = Q_P^2 / (4\pi\epsilon_0 c^2 M_P) \quad (3.14)$$

$$e = \sqrt{2h\alpha / (\mu_0 c)} \quad Q_P = \sqrt{2hK / (\mu_0 c)}, \quad (3.15)$$

где K в формуле для заряда планковского экземпляра заменяет постоянную тонкой структуры в формуле для элементарного заряда².

4. Радиус и масса мира

Из (1.1), с учётом (1.2), используя для значений физических постоянных данные CODATA за 2010 год, можно определить радиус мира:

$$R = \frac{r_e^2}{r_g} = \frac{r_e^2 c^2}{G m_e} = 1,17392(14) \cdot 10^{28} \text{ м.} \quad (4.1)$$

А по формуле (1.2), с учётом (1.3), можно вычислить массу вещества в мире:

$$M = \frac{R c^2}{G} = 1,58090(38) \cdot 10^{55} \text{ кг.} \quad (4.2)$$

5. Симметрия мира в соотношениях между физическими постоянными

В таблицах 2 — 11 представлены наглядные результаты, показывающие, в каких соотношениях между собой находятся фундаментальные физические постоянные таблицы 1.

Предварительные замечания:

– силы Кулона, Лоренца и гравитации рассчитывались для расстояния r_e , являющегося, согласно формуле основной симметрии (1.1), естественным единичным расстоянием; при этом сила Лоренца рассчитывалась по формуле: $F_L = e c B$, где $B = \mu_0 c / (4\pi r^2)$ при $\mu = 1$.

– значения величин физических постоянных для расчёта брались из данных CODATA за 2010 год, кроме планковских, которые, для получения более наглядного результата, рассчитывались по известным формулам.

² О том, почему это так, будет сообщено позже.

Таблица 2. Соотношения, значения которых равны фундаментальному коэффициенту K

Наименование	Выражение	Значение
Отнош. радиуса электрона к грав. радиусу электрона	r_e/r_g	$4,16589(50) \cdot 10^{42}$
Отношение радиуса мира к радиусу электрона	R/r_e	$4,16589(50) \cdot 10^{42}$
Отнош. радиуса планк. экземпляра к планк. длине	r_p/l_p	$4,16589(50) \cdot 10^{42}$
Корень квадратн. отнош. массы мира к массе электрона	$\sqrt{M/m_e}$	$4,16589(50) \cdot 10^{42}$
Отношение сил Кулона к силам гравитации	F_k/F_g	$4,16589(50) \cdot 10^{42}$
Отношение сил Лоренца к силам гравитации	F_L/F_g	$4,16589(50) \cdot 10^{42}$
Фундаментальный коэффициент	K	$4,16589(50) \cdot 10^{42}$

Таблица 3. Число элементарных экземпляров в мире (N)

Наименование	Выражение	Значение
Отношение радиуса мира к гравитац. радиусу электрона	R/r_g	$1,73547(21) \cdot 10^{85}$
Отношение массы мира к массе электрона	M/m_e	$1,73547(21) \cdot 10^{85}$
Отношение квадр. радиуса мира к квадр. радиуса электр.	R^2/r_e^2	$1,73547(21) \cdot 10^{85}$
Квадрат фундаментального коэффициента	K^2	$1,73547(21) \cdot 10^{85}$

Таблица 4. Число элементарных экземпляров в планковском экземпляре ($N_{e/pl}$)

Наименование	Выражение	Значение
Отношение планковск. длины к гравитац. радиусу электр.	l_p/r_g	$2,38930(43) \cdot 10^{22}$
Отношение планковской массы к массе электрона	M_p/m_e	$2,38930(43) \cdot 10^{22}$
Отнош. радиуса планковск. экземпляра к радиусу электр.	r_p/r_e	$2,38930(43) \cdot 10^{22}$
Отнош. заряда планк. экземпляра к элементарн. заряду	Q_p/e	$2,38930(43) \cdot 10^{22}$
Планковский коэффициент	K_p	$2,38930(14) \cdot 10^{22}$

Таблица 5. Число планковских экземпляров в мире $N_p = K_p$

Наименование	Выражение	Значение
Отношение радиуса мира к планковской длине	R/l_p	$7,2635(13) \cdot 10^{62}$
Отношение массы мира к планковской массе	M/M_p	$7,2635(13) \cdot 10^{62}$
Отношение квадрата фундаментального коэффициента к планковскому коэффициенту	K^2/K_p	$7,2635(13) \cdot 10^{62}$

Таблица 6. Прочие соотношения между фундаментальными радиусами

Наименование	Выражение	Значение
Отношение радиуса электрона к планковской длине	r_e/l_p	$1,7436(31) \cdot 10^{20}$
Отношение радиуса мира к радиусу планк. экземпляра	R/r_p	$1,7436(31) \cdot 10^{20}$
Отнош. радиуса планк. экзempl. к грав. радиусу электрона	r_p/r_g	$9,9536(18) \cdot 10^{64}$

Таблица 7. Отношения фундаментальных радиусов

Отношения радиусов	l_p	r_e	r_p	R
r_g	$2,38930 \cdot 10^{22}$	$4,16590 \cdot 10^{42}$	$9,95360 \cdot 10^{64}$	$1,73547 \cdot 10^{85}$
l_p		$1,74356 \cdot 10^{20}$	$4,16590 \cdot 10^{42}$	$7,26349 \cdot 10^{62}$
r_e			$2,38930 \cdot 10^{22}$	$4,16590 \cdot 10^{42}$
r_p				$1,74356 \cdot 10^{20}$

Таблица 8. Отношения фундаментальных масс

Отношения масс	M_p	M
m_e	$2,38930 \cdot 10^{22}$	$1,73547 \cdot 10^{85}$
M_p		$7,26349 \cdot 10^{62}$

Таблица 9. Отношение фундаментальных зарядов

Отношение зарядов	Q_p
e	$2,38930 \cdot 10^{22}$

Таблица 10. Произведения фундаментальных отношений

Произведения отношений	$1,7436 \cdot 10^{20}$	$2,3893 \cdot 10^{22}$	$4,1659 \cdot 10^{42}$	$7,2635 \cdot 10^{62}$	$9,9536 \cdot 10^{64}$	$1,7355 \cdot 10^{85}$
$1,7436 \cdot 10^{20}$	$3,0400 \cdot 10^{40}$	$4,1659 \cdot 10^{42}$	$7,2635 \cdot 10^{62}$	$1,2664 \cdot 10^{83}$	$1,7355 \cdot 10^{85}$	$3,0259 \cdot 10^{105}$
$2,3893 \cdot 10^{22}$		$5,7088 \cdot 10^{44}$	$9,9536 \cdot 10^{64}$	$1,7355 \cdot 10^{85}$	$2,3782 \cdot 10^{87}$	$4,1466 \cdot 10^{107}$
$4,1659 \cdot 10^{42}$			$1,7355 \cdot 10^{85}$	$3,0259 \cdot 10^{105}$	$4,1466 \cdot 10^{107}$	$7,2298 \cdot 10^{127}$
$7,2635 \cdot 10^{62}$				$5,2758 \cdot 10^{125}$	$7,2298 \cdot 10^{127}$	

Таблица 11. Отношения фундаментальных отношений

Отношения отношений	$1,7436 \cdot 10^{20}$	$2,3893 \cdot 10^{22}$	$4,1659 \cdot 10^{42}$	$7,2635 \cdot 10^{62}$	$9,9536 \cdot 10^{64}$	$1,7355 \cdot 10^{85}$
$1,7436 \cdot 10^{20}$	1	$1,3704 \cdot 10^2$	$2,3893 \cdot 10^{22}$	$4,1659 \cdot 10^{42}$	$5,7088 \cdot 10^{44}$	$9,9536 \cdot 10^{64}$
$2,3893 \cdot 10^{22}$	$7,2974 \cdot 10^{-3}$	1	$1,7436 \cdot 10^{20}$	$3,0400 \cdot 10^{40}$	$4,1659 \cdot 10^{42}$	$7,2635 \cdot 10^{62}$
$4,1659 \cdot 10^{42}$	$4,1853 \cdot 10^{-23}$	$5,7354 \cdot 10^{-21}$	1	$1,7436 \cdot 10^{20}$	$2,3893 \cdot 10^{22}$	$4,1659 \cdot 10^{42}$
$7,2635 \cdot 10^{62}$	$2,4004 \cdot 10^{-43}$	$3,2895 \cdot 10^{-41}$	$5,7354 \cdot 10^{-21}$	1	$1,3704 \cdot 10^2$	$2,3893 \cdot 10^{22}$
$9,9536 \cdot 10^{64}$	$1,7517 \cdot 10^{-45}$	$2,4004 \cdot 10^{-43}$	$4,1853 \cdot 10^{-23}$	$7,2974 \cdot 10^{-3}$	1	$1,7436 \cdot 10^{20}$
$1,7355 \cdot 10^{85}$	$1,0047 \cdot 10^{-65}$	$1,3767 \cdot 10^{-63}$	$2,4004 \cdot 10^{-43}$	$4,1853 \cdot 10^{-23}$	$5,7354 \cdot 10^{-21}$	1

Найденные симметрии пронизывают собой все соотношения между фундаментальными физическими постоянными. Из таблицы 10, с учётом того, что каждое её значение может быть представлено целым рядом формул (таблицы 2 – 6), следует, например, такая цепочка равенств:

$$\begin{aligned} \frac{R l_p}{r_p r_g} &= \frac{R M_p}{r_p m_e} = \frac{R Q_p}{r_p e} = \frac{r_e M_p}{l_p m_e} = \frac{r_e Q_p}{l_p e} = \\ &= \frac{r_e M_p}{l_p m_e} = \frac{r_e Q_p}{l_p e} = \frac{r_e}{r_g} = \frac{R}{r_e} = \frac{r_p}{l_p} = \frac{F_K}{F_g} = \frac{F_L}{F_g} = \sqrt{\frac{M}{m_e}}; \end{aligned} \quad (5.1)$$

или такая:

$$\begin{aligned} \frac{r_e r_p}{r_g l_p} &= \frac{r_e F_K}{r_g F_g} = \frac{r_e F_L}{r_g F_g} = \frac{r_e \sqrt{M}}{r_g \sqrt{m_e}} = \frac{R r_p}{r_e l_p} = \frac{R F_K}{r_e F_g} = \frac{R F_L}{r_e F_g} = \frac{R \sqrt{M}}{r_e \sqrt{m_e}} = \frac{r_p F_K}{l_p F_g} = \\ &= \frac{r_p F_L}{l_p F_g} = \frac{r_p \sqrt{M}}{l_p \sqrt{m_e}} = \frac{F_K F_L}{F_g F_g} = \frac{F_K \sqrt{M}}{F_g \sqrt{m_e}} = \frac{F_L \sqrt{M}}{F_g \sqrt{m_e}} = \frac{R}{r_g} = \frac{M}{m_e} = \frac{R^2}{r_e^2}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

6. Фундаментальная система соотношений между физическими постоянными

Во время расчёта таблицы 11, как и во время получения формулы (3.15) для Q_p , выяснилось, что $K = \alpha K_p^2$. Первоначально это выражение было выявлено эмпирически. Однако, оно может быть получено и аналитически при подстановке $r_e = \frac{\alpha \hbar}{m_e c}$ в (2.2) с учётом (3.9).

Таким образом, постоянная тонкой структуры может быть выражена через планковский и фундаментальный коэффициенты:

$$\boxed{\alpha = K/K_p^2}. \quad (6.1)$$

Симметрия мира проявляется и в соотношениях с участием постоянной тонкой структуры, в том числе аналогичных по форме (1.1), например:

$$\frac{R}{r_p} = \frac{r_p}{r_e} \alpha \quad R r_e = \alpha r_p^2 \quad K r_e^2 = \alpha r_p^2 \quad (6.2)$$

$$\alpha \frac{r_p}{r_e} = \frac{r_e}{l_p} \quad \alpha r_p l_p = r_e^2 \quad \alpha K l_p^2 = r_e^2 \quad (6.3)$$

$$\frac{r_e}{l_p} = \frac{l_p}{r_g} \alpha \quad r_e r_g = \alpha l_p^2 \quad K r_g^2 = \alpha l_p^2 \quad (6.4)$$

Получив две фундаментальных симметрии, основанных на больших числах, K и K_p , можно создать систему соотношений между физическими постоянными, самым естественным образом основанную на найденных соотношениях.

Определяем физические постоянные, которые будут выступать в качестве единичных:³

- классический радиус электрона r_e
- масса электрона m_e
- элементарный заряд e
- скорость света c

Из (3.13) мы знаем, что $R/r_e = K$, также как и $r_e/r_g = K$. Откуда при $r_e = 1$ следует, что $R = K$ и $r_g = 1/K$. Тогда из (3.10) следует, что $l_p = K_p/K$, а из (3.11) — что $r_p = K_p$.

Таким образом, мы выразили все радиусы таблицы 7 в виде формул, основанных на фундаментальном коэффициенте K и планковском коэффициенте K_p . Внутренние клетки этой таблицы легко заполняются на основе найденных выражений.

Теперь, что касается масс. $m_e = 1$. Тогда, согласно (3.9), планковская масса: $M_p = K_p$. Из того, что $M/m_e = K^2$, следует, что $M = K$, откуда заполняется ещё одна клетка таблицы 8.

При $e = 1$ из формулы (3.12) следует, что $Q_p = K_p$.

³ Система оказалась не инвариантна по отношению к выбору единичных постоянных. Указанный набор — единственно верный.

Таблица 12. Система соотношений между фундаментальными физическими постоянными

Физическая постоянная	Обозначение	Формула СИ	Выражение
Фундаментальный коэффициент	K	r_e/r_g	K
Планковский коэффициент	K_P	l_P/r_g	K_P
Классический радиус электрона	r_e	1	1
Масса электрона	m_e	1	1
Скорость света	c	1	1
Элементарный заряд	e	1	1
Коэффициент в законе Кулона	k	$m_e c^2 r_e / e^2$	1
Гравитационная постоянная	G	Rc^2/M	$1/K$
Гравитационный радиус электрона	r_g	Gm_e/c^2	$1/K$
Планковская длина	l_P	$\sqrt{\hbar G c^3}$	K_P/K
Комптоновский радиус планковского экземпляра	$\bar{\lambda}_C^P$	$h/(2\pi c M_P)$	K_P/K
Постоянная тонкой структуры	α	$e^2/(4\pi\hbar c \epsilon_0)$	K/K_P^2
Постоянная Дирака (редуцир. постоянная Планка)	\hbar	$e^2 \mu_0 c / (4\pi\alpha)$	K_P^2/K
Комптоновский радиус электрона	$\bar{\lambda}_C$	$\hbar/(2\pi m_e c)$	K_P^2/K
Боровский радиус	α_0	r_e/α^2	K_P^4/K^2
Планковская масса	M_P	$\sqrt{\hbar c/G}$	K_P
Радиус планковского экземпляра	r_P	$Q_P^2/(4\pi\epsilon_0 c^2 M_P)$	K_P
Заряд планковского экземпляра	Q_P	$\sqrt{2\hbar K/(\mu_0 c)}$	K_P
Радиус мира	R	r_e^2/r_g	K
Масса мира	M	Rc^2/G	K^2
Число элементарн. экзempl. в планк. экзemplяре	$N_{e/P}$	M_P/m_e	K_P
Число планковских экзemplяров в мире	N_P	M/M_P	K^2/K_P
Число элементарных экзemplяров в мире	N	M/m_e	K^2
Полная энергия мира	E	Mc^2	K^2
Действие мира	H	McR	K^3

Остальные физические постоянные могут быть найдены по известным физическим формулам, в которые подставляются уже найденные выражения для физических постоянных через фундаментальные коэффициенты K и K_P .

Теперь мы можем создать систему соотношений между фундаментальными физическими постоянными, все постоянные которой выражаются только через два числа: фундаментальный коэффициент K и планковский коэффициент K_P . Результат представлен в таблице 12.

Таким образом, любая не ядерная фундаментальная физическая постоянная может быть представлена в виде:

$$\boxed{AnyConst = K^m K_P^n}, \quad (6.5)$$

где K и K_P — известные большие числа, а m и n — небольшие целые числа.

Полученное выражение является следствием некоторой геометрии, лежащей в основе мира. Система соотношений между фундаментальными⁴ физическими постоянными приоткрывает взаимные связи между физическими постоянными на самом глубоком уровне, показывая их общую до-размерностную природу.

⁴ Под фундаментальностью постоянных подразумевается не значимость, а простота основания.

Таблица 13. Соответствие постоянных комбинированной системы с коррекцией постоянной Планка постоянным CODATA 2010г.

1	2	3	4	5	6
Постоянная	Значение постоянной по данным CODATA	Значение постоянной в комбинированной системе с коррекцией постоянной Планка	Абсолютное отклонение постоянных системы от постоянных CODATA	Допуск на абсолютное отклонение постоянной по CODATA	Относительное отклонение постоянных системы от допуска CODATA
e	$1,602176565 \cdot 10^{-19}$	$1,602176565 \cdot 10^{-19}$	(точно)	$3,5 \cdot 10^{-27}$	(точно)
m_e	$9,10938291 \cdot 10^{-31}$	$9,10938291 \cdot 10^{-31}$	(точно)	$4,0 \cdot 10^{-38}$	(точно)
r_e	$2,8179403267 \cdot 10^{-15}$	$2,81794032680003 \cdot 10^{-15}$	$1,0 \cdot 10^{-25}$	$2,7 \cdot 10^{-24}$	0,04
c	$2,99792458 \cdot 10^8$	$2,99792458 \cdot 10^8$	(точно)	(точно)	(точно)
ε_0	$8,854187817 \cdot 10^{-12}$	$8,85418781762040 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^{-22}$	(точно)	
μ_0	$1,2566370614 \cdot 10^{-6}$	$1,25663706143592 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-17}$	(точно)	
G	$6,67384 \cdot 10^{-11}$	$6,67384 \cdot 10^{-11}$	(точно)	$8,0 \cdot 10^{-15}$	(точно)
α	$7,2973525698 \cdot 10^{-3}$	$7,29735256989499 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-14}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	0,04
h	$6,62606957 \cdot 10^{-34}$	$6,62606957511030 \cdot 10^{-34}$	$5,1 \cdot 10^{-43}$	$2,9 \cdot 10^{-41}$	0,02
\hbar	$1,054571726 \cdot 10^{-34}$	$1,05457172614962 \cdot 10^{-34}$	$1,5 \cdot 10^{-44}$	$4,7 \cdot 10^{-42}$	0,00
λ_C	$2,4263102389 \cdot 10^{-12}$	$2,42631023899035 \cdot 10^{-12}$	$9,0 \cdot 10^{-23}$	$1,6 \cdot 10^{-21}$	0,06
R_∞	$1,0973731568539 \cdot 10^7$	$1,09737315685385 \cdot 10^7$	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	0,01
α_0	$5,2917721092 \cdot 10^{-11}$	$5,29177210928359 \cdot 10^{-11}$	$8,4 \cdot 10^{-22}$	$1,7 \cdot 10^{-20}$	0,05
μ_B	$9,27400968 \cdot 10^{-24}$	$9,27400968013825 \cdot 10^{-24}$	$1,4 \cdot 10^{-34}$	$2,0 \cdot 10^{-31}$	0,00
M_p	$2,17651 \cdot 10^{-8}$	$2,17650925328462 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-15}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	0,01
l_p	$1,616199 \cdot 10^{-35}$	$1,61619925632658 \cdot 10^{-35}$	$2,6 \cdot 10^{-42}$	$9,7 \cdot 10^{-40}$	0,00

7. Точность полученных симметрий

Все выражения для физических постоянных через фундаментальные коэффициенты K и K_p являются точными. Для демонстрации этого факта в качестве расширения возможностей, даваемых CODATA, была разработана система физических постоянных, обеспечивающая относительную точность взаимных расчётов постоянных на уровне порядка 10^{-16} .

В таблице 13 представлена «Комбинированная система физических постоянных с коррекцией постоянной Планка». В комбинированной системе часть постоянных взята из данных CODATA 2010 года, часть – рассчитана по известным физическим формулам на основании этих же данных CODATA, и только одна постоянная (постоянная Планка) подвергнута ручной коррекции в пределах 2% (0,02) от допуска на её неточность, даваемого CODATA. Таким образом, корректировка минимальна.

Смысл создания данной системы: обеспечение относительной точности взаимных расчётов физических постоянных на уровне, существенно более высоком, чем это достижимо с помощью набора постоянных, даваемого CODATA, при минимальном расхождении с постоянными CODATA. Это необходимо для проверки того факта, что найденная симметрия не зависит от числовых значений набора постоянных CODATA, а имеет место только если с высокой точностью соблюдаются физические формулы, связывающие между собой физические постоянные. При этом постоянные комбинированной системы совпадают с постоянными, даваемыми CODATA с хорошей степенью точности, что видно из таблицы 13.

Опираясь далее на комбинированную систему для проверки точности физических постоянных, выраженных через фундаментальные коэффициенты K и K_P , мы исходим из того, что за прошедшее с момента опубликования гипотезы больших чисел Дирака время так и не появилось надёжных данных, говорящих о зависимости величин физических постоянных от времени, а, следовательно, нет достаточных оснований считать физические формулы, связывающие все известные постоянные друг с другом, неточными. Более того, с учётом полученных выше фундаментальных симметрий и формулы (6.5) такой вариант представляется ещё менее вероятным.

Детальное описание разработки системы физических постоянных выходит за рамки данной работы, поэтому в таблице 13 представлен только результат.

Все постоянные в колонке 3 таблицы 13 имеют такие величины, что относительная точность вычисления одних постоянных системы через другие по различным связывающим их физическим формулам лучше 10^{-15} . Для набора постоянных CODATA 2010 года эта точность на несколько порядков ниже.

В колонке 6 представлен результат деления данных из колонки 4 на данные из колонки 5, то есть относительное отклонение постоянных комбинированной системы от допуска на это отклонение, даваемого CODATA. Малые величины относительных отклонений указывают на хорошую совместимость физических постоянных разработанной системы с данными CODATA, что также видно из простого сравнения значений постоянных, даваемых CODATA и полученных в системе.

Все расчёты, представленные в работе, производились в электронных таблицах MS Excel, которые в явном виде поддерживают мантиссу числа длиной 15 разрядов (плюс один скрытый). Достигнутая относительная точность взаимных расчётов постоянных по различным формулам на уровне 10^{-16} объясняется именно этим.

8. Сводная таблица физических постоянных

В таблице 14 сведены вместе значения постоянных в фундаментальной системе соотношений между физическими постоянными (колонка 4), полученные из выражений в колонке 3 и значения, переведённые в СИ из фундаментальной системы соотношений через переводные коэффициенты таблицы 15 (колонка 5).

Из таблицы 14 видно, что величины физических постоянных, рассчитанных на основе известных физических формул, в точности равны величинам, рассчитанным на основе новой формулы 6.5.

Значения в таблицах 14 и 15 рассчитаны с использованием комбинированной системы физических постоянных с коррекцией постоянной Планка, позволяющей рассчитывать физические постоянные с относительной точностью на уровне 10^{-16} . Этим объясняются абсолютно одинаковые, вплоть до последнего знака мантиссы, значения физических постоянных, переведённых в СИ из фундаментальной системы соотношений через переводные коэффициенты и значений этих же постоянных в СИ.

Поскольку значения постоянных в СИ полностью совпадают с величинами, полученными в колонке 5 через переводные коэффициенты, эти данные совмещены в одной колонке 5, которая по этой причине имеет два заголовка.

В таблице 15 представлены переводные коэффициенты из фундаментальной системы соотношений в систему СИ и обратно (к таблице 14). Для перевода значения из системы соотношений в СИ необходимо умножить это значение на коэффициент с соответствующей размерностью. Для обратного перевода — разделить на этот коэффициент. Перевод постоянной Ридберга осуществляется с учётом выбранной для неё единицы измерения.

В сводной таблице есть две постоянные, выражения для которых не вписываются в рамки формулы (6.5). Это выражение для магнетона Бора ($K_P^2/(2K)$) и постоянной Ридберга ($K^3/(4\pi K_P^6)$). При этом 4π нужно рассматривать как $2 \cdot 2\pi$. «Лишние» 2π объясняются тем, что формула для постоянной Ридберга построена на основе длины волны, а все выражения для постоянных в таблице 14 — на основе радиусов. «Лишние» же двойки в знаменателе выражений для обеих постоянных говорят о том, что для данных постоянных физически более фундаментальными являются величины в два раза большие. Однако, исторически (или по иным причинам) сложилось так, что закрепилась используемая величина. Примерно так же, как это произошло с двойкой в формуле для гравитационного радиуса. Действительно же фундаментальными являются выражения K_P^2/K для магнетона Бора и K^3/K_P^6 для постоянной Ридберга.

Таблица 14. Сводная таблица физических постоянных

1	2	3	4	5
Физическая постоянная	Обозначение	Выражение	Значение в фундаментальной системе соотношений физических постоянных	Значение, переведённое в СИ из фундаментальной системы соотношений
				= Значение в СИ
Фундаментальн. коэфф.	K	K	$4,16589624758784 \cdot 10^{42}$	$4,16589624758784 \cdot 10^{42}$
Планковск. коэффициент	K_P	K_P	$2,38930482425469 \cdot 10^{22}$	$2,38930482425469 \cdot 10^{22}$
Постоянн. тонк. структуры	α	K/K_P^2	$7,29735256989499 \cdot 10^{-3}$	$7,29735256989499 \cdot 10^{-3}$
Классич. радиус электрона	r_e	1	1	$2,81794032680003 \cdot 10^{-15}$
Масса электрона	m_e	1	1	$9,10938291 \cdot 10^{-31}$
Скорость света	c	1	1	$2,99792458 \cdot 10^8$
Элементарный заряд	e	1	1	$1,602176565 \cdot 10^{-19}$
Коэфф. в законе Кулона	k	1	1	$8,98755178736818 \cdot 10^9$
Электрическая постоянная	ϵ_0	$1/(4\pi)$	$7,95774715459478 \cdot 10^{-2}$	$8,85418781762040 \cdot 10^{-12}$
Магнитная постоянная	μ_0	4π	$1,25663706143592 \cdot 10^1$	$1,25663706143592 \cdot 10^{-6}$
Гравитационн. постоянная	G	$1/K$	$2,40044384345632 \cdot 10^{-43}$	$6,67384000000000 \cdot 10^{-11}$
Сила Кулона (на расст. r_e)	F_K	1	1	$2,90535075835201 \cdot 10^1$
Сила Лоренца (на расст. r_e)	F_L	1	1	$2,90535075835201 \cdot 10^1$
Сила гравит. (на расст. r_e)	F_g	$1/K$	$2,40044384345632 \cdot 10^{-43}$	$6,97413134096721 \cdot 10^{-42}$
Гравит. радиус электрона	r_g	$1/K$	$2,40044384345632 \cdot 10^{-43}$	$6,76430750869441 \cdot 10^{-58}$
Комптон. радиус электрона	$\bar{\lambda}_C$	K_P^2/K	$1,37035999072523 \cdot 10^2$	$3,86159268009793 \cdot 10^{-13}$
Компт. радиус планк. экз.	$\bar{\lambda}_C^P$	K_P/K	$5,73539205552264 \cdot 10^{-21}$	$1,61619925632658 \cdot 10^{-35}$
Боровский радиус	α_0	K_P^4/K^2	$1,87788650418044 \cdot 10^4$	$5,29177210928359 \cdot 10^{-11}$
Магнетон Бора	μ_B	$K_P^2/(2K)$	$6,85179995362613 \cdot 10^1$	$9,27400968013825 \cdot 10^{-24}$
Постоянная Ридберга	R_∞	$K^3/(4\pi K_P^6)$	$3,09233207224631 \cdot 10^{-8}$	$1,09737315685385 \cdot 10^7$
Постоянная Дирака	\hbar	K_P^2/K	$1,37035999072523 \cdot 10^2$	$1,05457172614962 \cdot 10^{-34}$
Планковская масса	M_P	K_P	$2,38930482425469 \cdot 10^{22}$	$2,17650925328462 \cdot 10^{-8}$
Планковская длина	l_P	K_P/K	$5,73539205552264 \cdot 10^{-21}$	$1,61619925632658 \cdot 10^{-35}$
Радиус планк. экземпляра	r_P	K_P	$2,38930482425469 \cdot 10^{22}$	$6,73291841728514 \cdot 10^7$
Заряд планк. экземпляра	Q_P	K_P	$2,38930482425469 \cdot 10^{22}$	$3,82808819606230 \cdot 10^3$
Число эл. экз. в планк. экз.	$N_{e/P}$	K_P	$2,38930482425469 \cdot 10^{22}$	$2,38930482425469 \cdot 10^{22}$
Число планк. экз-ов в мире	N_P	K^2/K_P	$7,26348993627467 \cdot 10^{62}$	$7,26348993627467 \cdot 10^{62}$
Число элемент. экз. в мире	N	K^2	$1,73546915456664 \cdot 10^{85}$	$1,73546915456664 \cdot 10^{85}$
Радиус мира	R	K	$4,16589624758784 \cdot 10^{42}$	$1,17392470333427 \cdot 10^{28}$
Масса мира	M	K^2	$1,73546915456664 \cdot 10^{85}$	$1,58090530574415 \cdot 10^{55}$
Полная энергия мира	E	K^2	$1,73546915456664 \cdot 10^{85}$	$1,42084683063007 \cdot 10^{72}$
Действие мира	H	K^3	$7,22978443881363 \cdot 10^{127}$	$5,56373967930455 \cdot 10^{91}$

Таблица 15. Переводные коэффициенты из системы соотношений в СИ и обратно

Значение постоянной по данным CODATA	Формула СИ	Значение
Коэффициент пересчёта длины в м	r_e	$2,81794032680003 \cdot 10^{-15}$
Коэффициент пересчёта массы в кг	m_e	$9,10938291 \cdot 10^{-31}$
Коэффициент пересчёта времени в с	r_e/c	$9,3996371543143 \cdot 10^{-24}$
Коэффициент пересчёта скорости в м/с	c	$2,99792458 \cdot 10^8$
Коэффициент пересчёта заряда в Кл	e	$1,602176565 \cdot 10^{-19}$
Коэффициент пересчёта силы в Н	F_K	$2,90535075835201 \cdot 10^1$
Коэффициент пересчёта постоянной Планка в Дж · с	$\hbar\alpha$	$7,69558169595653 \cdot 10^{-37}$
Коэффициент пересчёта грав. постоянной в $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	GK	$2,78025250130016 \cdot 10^{32}$
Коэффициент пересчёта энергии в Дж	$\hbar\alpha c/r_e$	$8,18710506545916 \cdot 10^{-14}$
Коэффициент пересчёта электрич. постоянной ϵ_0 в Ф/м	$4\pi\epsilon_0$	$1,11265005605362 \cdot 10^{-10}$
Коэффициент пересчёта магнитной постоянной μ в Н/А ²	$\mu_0/(4\pi)$	$1,0 \cdot 10^7$
Коэффициент пересчёта магнетона Бора μ_B в Дж/Тл	$2\alpha\mu_B$	$1,35351436745176 \cdot 10^{-25}$

Заключение

1. Все три предположения, сделанных в начале работы, а именно, о верности гипотезы Г. Вейля, согласно которой $R/r_e = r_e/r_g$, о формуле гравитационного радиуса $R_g = Gm/c^2$, а также о равенстве радиуса мира его гравитационному радиусу $R = R_g$, оказались плодотворными. Значения постоянных, полученных по физическим формулам и по выражениям фундаментальной симметрии аналитически тождественны, из чего необходимо следует, что мир имеет конфигурацию, в своей основе соответствующую указанным предположениям.
2. Соотношения между не ядерными физическими постоянными, как размерными, так и безразмерными, как атомными, так и космологическими, оказались основаны всего на двух физических величинах: K и K_p . Выяснилось, что все фундаментальные не ядерные физические постоянные представимы в виде $AnyConst = K^m K_p^n$ (6.5), где K и K_p — известные большие числа, а m и n — небольшие целые числа.
3. При изменении исходных значений постоянных в формуле (6.5), изменяются и значения фундаментальных коэффициентов K и K_p . Но сама формула при этом не нарушается, выполняясь, как и другие физические формулы, с точностью, определяемой только точностью использованных в расчётах постоянных.
4. Предельная простота и универсальность формулы (6.5) для всех не ядерных физических постоянных наводят на мысль, что выражения для физических постоянных через фундаментальные коэффициенты являются более фундаментальными, чем хорошо известные физические формулы.
5. Число и размерность основных (независимых) постоянных имеет фундаментальное значение. Основных физических постоянных оказалось всего две. При этом они безразмерны и инвариантны по определению, в любой системе физических единиц. Следовательно, абсолютных масштабов в мире нет, сама основа мира является не размерностной (абсолютной), а геометрической (относительной).
6. Геометрическая основа мира на базе инверсии (1.1), позволяющая представить физические постоянные в виде универсальной формулы (6.5), не предполагает времени. Что в свою очередь может говорить о том, что гипотеза Дирака об изменяющихся со временем физических постоянных в корне ошибочна.

7. Фундаментальные постоянные K и K_p — это соотношения, выражающие количества: число элементарных экземпляров в мире и в планковском экземпляре, соответственно. Следовательно, можно ожидать, что эти числа — целые, а постоянная тонкой структуры — рациональное число.
8. Постоянная тонкой структуры — вторичная константа, в своей основе имеющая определённое соотношение между двумя фундаментальными коэффициентами: $\alpha = K/K_p^2$. На этом уровне представления постоянная тонкой структуры — есть *коэффициент формы*. При этом, если под термином «большие числа» в космологии понимать только те числа, которые возникают в соотношениях между фундаментальными физическими постоянными, то постоянная Зоммерфельда (обратная величина постоянной тонкой структуры) — наименьшее большое число (см. таблицу 11).
9. Масса мира и его радиус связаны соотношением: $M/m_e = (R/r_e)^2$. То есть вся масса мира состоит из элементарных экземпляров, масса и размер которых в точности равны массе и размеру электрона. Этот факт означает, что мир на фундаментальном уровне состоит только из элементарных экземпляров. Все другие элементарные частицы в мире вторичны, имеют качественно иное строение, и должны тем или иным образом состоять из элементарных экземпляров. Элементарные же экземпляры, судя по всему, являются по своей природе структурно наиболее простыми элементами. В связи с этим можно предположить, что у электрона структура никогда не будет обнаружена.
10. Формула (1.1) предполагает, что мир имеет кривизну. Поэтому красное космологическое смещение должно иметь в своей природе факторы, связанные с наличием этой кривизны.
11. Поскольку фундаментальная симметрия мира, основанная на трёх ранее упомянутых предположениях, оказалась точной, мир, согласно формуле (1.3), представляет собой абсолютно чёрное тело, которому присуще излучение тепловой природы, трактуемое в настоящее время как реликтовое (или только как реликтовое).
12. Нельзя исключить, что некоторые другие физические постоянные, например массы и радиусы протона и нейтрона, могут вписываться в полученную формулу в виде дополнительного члена или членов. То есть формула (6.5) для большего спектра физических констант может иметь общий вид: $AnyConst = K_1^k \dots K_x^n$.

Благодарности

Автор выражает благодарность Ю. С. Владимирову за возможность выступить на семинаре «Геометрия и физика» на физфаке МГУ, К. А. Томилину за полезное обсуждение работы, а также В. Худякову, в том числе за советы по вёрстке в L^AT_EX.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томилин К.А. Большие числа и гипотеза о зависимости от времени мировых констант // Исследования по истории физики и механики, 1995–1997. М.: Наука, 1999. С. 141–159.
2. Weyl H. Eine neue Erweiterung der Relativitätstheorie, *Annalen der Physik*. 1919. Vol. 364. №10. Pp. 101–133.

Поступила в редакцию 04.05.2014

Иванков Константин Владимирович, г. Тула, Россия.
E-mail: kivankov@gmail.com; http://kivankov.ru

K. V. Ivankov

High-precision fundamental symmetry of the universe in relations between the physical constants

Keywords: fundamental symmetry, the relations between physical constants, the universal formula for the physical constants, large numbers

PACS: 12.60.-i; 12.60.Jv; 12.90.+b

A high-precision fundamental symmetry of the universe based on two known relations between physical constants, large numbers, has been discovered. The symmetry exhibits itself in relations between physical constants of atomic and cosmological levels. An all-purpose analytical connection between a number of fundamental physical constants has been identified. A system of physical constants with two independent stationary values has been constructed wherein all fundamental non-nuclear physical constants can be represented in the form:

$$AnyConst = K^m K_P^n,$$

where K and K_P are known large numbers while m and n are small integers.

Any changes in the original set of constants result in changes in fundamental factors, K and K_P . Nevertheless, the formula still holds within a precision range only determined by the precision of constants going into the formula.

Findings have been obtained with a precision commensurate with the precision of CODATA constants for 2010. In an additional study, they have been confirmed to a relative precision of 10^{-15} or better and represented using analytical expressions, numerical values and tables.

The ultimate simplicity and uniformity of the resulting formula for a number of physical constants speaks well for the fact that relations discovered between physical constants are more fundamental than well-known physical formulas.

REFERENCES

1. Tomilin K.A. *Bol'shie chisla i gipoteza o zavisimosti ot vremeni mirovykh konstant* (Large Numbers and the Hypothesis of Time-Variability of Universal Constants), Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki, 1995–1997. Moscow: Nauka, 1999, pp. 141–159.
2. Weyl H. Eine neue Erweiterung der Relativitätstheorie, *Annalen der Physik*. 1919. Vol. 364. No 10. Pp. 101–133.

Received 04.05.2014

Ivankov Konstantin Vladimirovich, Tula, Russia.
E-mail: kivankov@gmail.com; <http://kivankov.ru>

УДК 530.12; 530.51

А. М. Баранов,¹ Е. В. Савельев²

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ КОНФОРМНО-ПЛОСКОЙ ВСЕЛЕННОЙ. II. ЛИНЕЙНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И МНОГОМЕРНЫЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНА

В рамках многомерного пространства-времени с одним временноподобным направлением рассмотрено получение конформно-плоских космологических моделей как точных решений уравнений тяготения для разных уравнений состояния с линейной связью между давлением и плотностью энергии. Утверждается, что такой подход приводит к выявлению некоторого дискретного набора уравнений состояния, для которых конформные множители тесно связаны с гармоническими функциями, являющимися решениями уравнений Лапласа в многомерных евклидовых пространствах целой размерности. Размерность этих пространств, в свою очередь, определяется конкретным уравнением состояния.

Ключевые слова: открытые космологические модели, точные решения гравитационных уравнений, многомерное пространство-время, конформно-плоские пространства, линейное уравнение состояния, многомерное уравнение Лапласа.

PACS: 04.20.-q; 98.80.Jk

Введение

При исследовании конформно-плоских пространств на основе общей теории относительности нередко получение и физический анализ соответствующих космологических моделей проводится в синхронной системе отсчета, что не всегда приемлемо с точки зрения нахождения точных аналитических решений уравнений Эйнштейна из-за ряда математических трудностей. Например, в такой системе отсчета нельзя получить в конечном виде решения для открытой космологической модели с некогерентной пылью и излучением. Однако эта задача решается с использованием несопутствующей системы отсчета ([1]- [3]), в которой 4-метрика пространства-времени конформно-плоская, а конформный множитель зависит только от одной переменной, играющей роль расстояния в 4-пространстве Минковского (подход Фока ([4], [5])). При этом оказывается, что такое описание эквивалентно введению кинематической системы отсчета (см., например, [6]- [8]) взамен синхронной [9]. Кроме того, использование синхронной системы отсчета не вполне отвечает симметрии космологической проблемы, где метрика зависит от одной переменной (см., например, [4]).

В работе [10] при обобщении фридмановской модели открытой Вселенной [11], записанной в форме Фока ([4], [5]), получено точное аналитическое решение с произвольной функцией состояния, которая определяется как отношение давления к плотности энергии. В частных случаях функция состояния совпадает с уравнениями состояния [10], в том числе и представляющими собой линейную связь плотности энергии и давления.

В предыдущей статье [1] было найдено обобщение решения Фридмана для открытой Вселенной на случай наличия как вещества, так и равновесного светоподобного излучения (подобного электромагнитному) с отличным от нуля давлением без введения конкретного уравнения состояния. Здесь мы обратимся непосредственно к проблеме уравнения состояния вещества в космологических моделях. На наш взгляд, этой проблеме уделяется незаслуженно мало внимания, хотя уравнение состояния является неотъемлемой частью системы уравнений Эйнштейна при решении космологических задач. Тем более, что успехи инфляционного подхода при решении некоторых проблем фридмановской космологии убеждают в том, что во Вселенной могут реализовываться самые различные состояния вещества (как с положительным, так и с отрицательным давлением).

По нашему убеждению, описание эволюции Вселенной с точки зрения изменения уравнения состояния может представлять собой совершенно особый подход, естественно соединяющий в себе физический (термодинамика, кинетика) и геометрический (кривизна, размерность пространства-времени), аспекты теории эволюции Вселенной. Успехи геометрического многомерного подхода в

¹ E-mail: alex_m_bar@mail.ru; Baranov@stfi.ru ; ©Баранов А.М.

² E-mail: editor@stfi.ru ; ©Савельев Е.В.

объединении фундаментальных взаимодействий приводят к мысли, что размерность пространства-времени так или иначе должна проявляться в физических величинах, характеризующих эволюцию Вселенной.

В настоящей работе в рамках многомерного пространства-времени с одним временноподобным направлением рассматривается получение конформно-плоских моделей как точных решений космологических уравнений Эйнштейна с отличным от нуля давлением для разных уравнений состояния при наличии линейной связи между плотностью энергии и давлением. Оказывается, что такой подход приводит к выявлению некоторого дискретного набора уравнений состояния, для которых конформные множители тесно связаны с гармоническими функциями, являющимися решениями уравнений Лапласа в многомерных евклидовых пространствах целой размерности. Размерность этих пространств, в свою очередь, определяется конкретным уравнением состояния.

Мы по-прежнему будем использовать подход Фока, в котором метрика 4-мерного (и многомерного) пространства-времени конформна галилеевой, а конформный множитель является функцией одной переменной.

1. Многомерные уравнения Эйнштейна

Поставим вопрос: к каким последствиям приведет изменение размерности пространства-времени в рамках конформно-плоских моделей и подхода Фока для уравнения состояния вещества, заполняющего Вселенную. Ответить на этот вопрос попытаемся в рамках подхода типа Калуцы-Клейна, используя метод, который Ю.С. Владимиров [7] называет индуктивным. Другими словами, будем увеличивать число пространственноподобных координат, оставляя одну временноподобную.

Метрику запишем в виде, аналогичном тому, как это сделано в [1]:

$$ds^2 = \exp(2\sigma) \delta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad (1.1)$$

где $\exp(2\sigma)$ – конформный множитель; $\sigma = \sigma(S)$; $S^2 = \delta_{\mu\nu} x^\mu x^\nu$; $\delta_{\mu\nu} = \text{diag}(1; -1; -1; \dots; -1)$ – метрический тензор типа Минковского для многомерного пространства-времени; скорость света и гравитационная постоянная Ньютона равны единице, поэтому эйнштейновская гравитационная постоянная здесь равна $\varkappa = 8\pi$. Но теперь индексы пробегают значения $\mu, \nu = 0, 1, \dots, N$, где N – число пространственноподобных координат.

Уравнения гравитационного поля постулируем в виде системы уравнений Эйнштейна (без космологической постоянной)

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\varkappa T_{\mu\nu} \quad (1.2)$$

где $G_{\mu\nu}$, $R_{\mu\nu}$ и R , – тензоры Эйнштейна, Риччи и скалярная кривизна соответственно, построенные из метрики (1.1) аналогично 4-мерному случаю; правая часть – многомерный аналог тензора энергии-импульса (ТЭИ) идеальной паскалевой жидкости, описывающий многомерную «жидкость»)

$$T_{\mu\nu} = \varepsilon u_\mu u_\nu + p b_{\mu\nu}, \quad (1.3)$$

где ε – аналог плотности энергии; p – аналог давления; $(N + 1)$ -скорость $u_\mu = \exp(\sigma) b_\mu$ пропорциональна градиенту переменной S как функции координат x^μ : $b_\mu = S_{,\mu}$; $u_\mu u^\mu = 1$ – условие нормировки $(N + 1)$ -скорости; $b_{\mu\nu} = u_\mu u_\nu - g_{\mu\nu}$ есть N -проектор на N -подпространство, который играет роль метрического тензора для N -подпространства, при этом выполняется условие ортогональности N -подпространства и временноподобной конгруэнции u^μ : $b_{\mu\nu} u^\mu = 0$.

Фактически, если $(N + 1)$ -скорость u^μ определить как аналог монады в многомерном пространстве времени по аналогии 4-мерием (см., например, [7]), то можно считать, что ТЭИ (1.3) записан согласно монадному подходу.

С другой стороны, левая часть системы (1.2) может быть представлена как

$$G_{\mu\nu} = (N - 1) \left(\left[\sigma'' - \frac{\sigma'}{S} - (\sigma')^2 \right] b_\mu b_\nu - \left[\sigma'' + \frac{N-1}{S} \sigma' + \frac{N-2}{2} (\sigma')^2 \right] \delta_{\mu\nu} \right), \quad (1.4)$$

где штрих обозначает производную d/dS .

Проводя процедуру $(1 + N)$ -расщепления как это делается в 4-мерии (см., например, [7]), получаем следующую систему уравнений, определяющих «плотность энергии» и «давление», и частным случаем которой, естественно, являются уравнения ([1], (1.4)-(1.5))

$$N(N-1) \left[\frac{\sigma'}{S} + \frac{(\sigma')^2}{2} \right] = \varkappa \varepsilon \exp(2\sigma); \quad (1.5)$$

$$(N-1) \left[\sigma'' + \frac{N-1}{S} \sigma' + \frac{N-2}{2} (\sigma')^2 \right] = -\varkappa p \exp(2\sigma). \quad (1.6)$$

Кавычки мы поставили потому, что, строго говоря, смысл этих понятий в случае многомерного пространства требует совершенно отдельного рассмотрения.

Как известно, открытая 4-мерная модель Фридмана [11] описывается уравнением состояния некогерентной пыли $p = 0$, которое является частным случаем линейного уравнения состояния, во многих случаях используемого в физике,

$$p(S) = \beta_0 \cdot \varepsilon(S), \quad (1.7)$$

где $|\beta_0| \leq 1$; $\beta_0 = const$.

Ряд физически интерпретируемых состояний 4-мерии описываются соотношением $p \propto \varepsilon$: физический вакуум, некогерентная пыль, релятивистский газ и т.п., и отвечают конкретным дискретным значениям параметра β_0 .

Уравнение состояния для многомерного пространства-времени, то есть связь между «давлением» и «плотностью энергии», постулируем в самом простом виде (1.7), который однако включает физически важные случаи.

В дальнейшем мы не будем использовать кавычки в силу того, что смысл введенных понятий плотности энергии и давления будет понятен из контекста.

Система уравнений (1.5) и (1.6) с учетом (1.7) и исключения плотности энергии $\varepsilon(S)$, сводится к одному уравнению

$$\sigma'' + [(N-1) + \beta_0 N] \frac{\sigma'}{S} + [(N-2) + \beta_0 N] \frac{(\sigma')^2}{2} = 0, \quad (1.8)$$

которое, в свою очередь, заменой

$$\sigma(S) = \frac{2}{(N-2) + N\beta_0} \ln y(S) \quad (1.9)$$

для $\beta_0 \neq (2-N)/N$ и $\sigma(S) = y(S)$ для $\beta_0 = (2-N)/N$ легко преобразуется к

$$y'' + \left(\frac{N(1+\beta_0) - 1}{S} \right) y' = 0. \quad (1.10)$$

Хотя это уравнение интегрируется тривиально, попытаемся извлечь из него несколько иную информацию. Легко заметить, что в случае целочисленного коэффициента при первой производной уравнение (1.10) представляет собой радиальную часть сферически-симметричного уравнения Лапласа в многомерном евклидовом пространстве размерности $k = N(1 + \beta_0)$,

$$y'' + \frac{(k-1)}{S} y' = \frac{1}{S^{(k-1)}} \frac{\partial}{\partial S} \left(S^{(k-1)} \frac{\partial y}{\partial S} \right) = 0, \quad (1.11)$$

где роль радиальной переменной играет все та же переменная S , величина которой сохраняется при переходах между различными евклидовыми пространствами аналогично тому, как в трехмерном пространстве радиус окружности является и радиусом сферы, построенной на этой окружности. Требование целочисленности k равносильно требованию дискретности значений $\beta_0 = k/N - 1$, число которых для каждого фиксированного N равно $(2N + 1)$, причем значения эти оказываются рациональными (если размерность пространства-времени является натуральным числом). При этом конформный множитель связан с функцией $y(S)$ следующим образом:

$$\exp(2\sigma(S)) = y^{\frac{4}{k-2}}. \quad (1.12)$$

Таким образом, для целых значений k решениями уравнения (1.11) оказываются фундаментальные гармонические функции порядка k (см., например, [12])

$$y_k = \left(B_k + \frac{A_k}{S^{k-2}} \right), k \neq 2; \quad y_2 = (B_2 + A_2 \ln(\alpha S)), k = 2, \quad (1.13)$$

где выбор постоянных связан с конкретной физической асимптотикой конформного множителя. При этом, строго говоря, k -мерные пространства, в которых эти функции будут гармоническими, не обязательно евклидовы, так как выполнимость уравнения (1.11) с целыми k может быть реализована и в конформно-евклидовом пространстве требованием обращения в нуль скалярной кривизны последнего. В самом деле, если рассмотреть пространство размерности n с конформно-евклидовой метрикой [13]

$$g_{ab} = \exp(2\sigma) \delta_{ab} \quad (1.14)$$

где $a, b = 1, 2, \dots, n$; $\delta_{ab} = (+1, +1, \dots, +1)$, то скалярная кривизна такого пространства запишется в виде

$$R^{(n)} = 4 \left(\frac{n-1}{n+1} \right) \left[\exp \left(-\frac{n+2}{2} \sigma \right) \right] \Delta_n y \quad (1.15)$$

где

$$\Delta_n y \equiv y'' + \frac{n-1}{S} y'$$

Итак, в рамках нашего подхода можно констатировать, что в конформно-плоских моделях, заполненных веществом с уравнением состояния (1.7), каждому типу вещества (то есть каждому конкретному β_0 из физически интерпретируемого дискретного множества значений), определяемому значениями N и k , соответствует «свое» евклидово (или конформно-евклидово) пространство, фундаментальная гармоническая функция которого определяет гравитационное поле (конформный множитель), создаваемое этим веществом. Тем самым в силу единственности временноподобного направления каждому типу вещества отвечает и «свое» многомерное пространство-время.

В том, что такая трактовка имеет смысл, можно убедиться, расписав закон сохранения тензора энергии-импульса для нашего случая. Проведем это, получим соотношение

$$\varepsilon = \frac{const}{[S \exp(\sigma)]^n}, \quad (1.16)$$

где $n = N(1 + \beta_0)$ в точности совпадает с k , введенным ранее. Величина $S \exp(\sigma(S)) = a(S)$ есть ни что иное, как радиус кривизны пространственноподобной гиперповерхности в синхронной системе отсчета. С другой стороны (см, например, [14]), правую часть можно интерпретировать как величину, обратно пропорциональную пространственному объему системы. Это требует, чтобы n представляло собой размерность последней.

Приведем два ярких, на наш взгляд, примера. При $N = 3$, $\beta_0 = 0$ (некогерентная пыль) имеем $n = 3$, то есть плотность энергии обратно пропорциональна трехмерному объему. При $N = 3$, $\beta_0 = 1/3$ (ультрарелятивистский газ) имеем $n = 4$, теперь плотность энергии обратно пропорциональна пространственноподобному четырехмерному объему. Другими словами, состояние вещества определяет «характерное» для данного вещества пространство, в котором плотность энергии убывает обратно пропорционально объему. Более того, легко увидеть, что единственным состоянием, для которого плотность энергии будет конечной на конусе $S = 0$, является физический вакуум ($\beta_0 = -1$), независимо от размерности N .

2. Четырехмерное пространство-время

Теперь мы конкретизируем значение размерности N . Так как нас прежде всего интересует многообразие, описывающее нашу Вселенную, то положим $N = 3$ и рассмотрим, какие значения β_0 будут характерны для этого случая (в смысле нашей трактовки).

Размерность лапласиана, то есть евклидова (конформно-евклидова) характерного пространства будет в этом случае определяться по формуле

$$n = 3(1 + \beta_0) \quad (2.1)$$

Дискретный набор значений β_0 , обеспечивающий целочисленность размерности (фундаментальность гармонических функций), будет содержать семь значений, начиная с нуля (напомним, что мы ограничились условием $|\beta_0| \leq 1$). Иначе говоря, конформно-плоскому 4-миру при различных β_0 , связанных с целыми n , соответствует семь ($n = 0, 1, \dots, 6$) евклидовых (конформно-евклидовых) пространств.

Выпишем для всех значений n ($0 \leq n \leq 6$) конформные множители, давление, четырехмерные и трехмерные скалярные кривизны, собственное время как функцию переменной S и метрику в синхронной системе отсчета.

2.1. $n = 0$, $\beta_0 = -1$

Состояние материи: физический вакуум (открытое решение де Ситтера)
Конформный множитель:

$$\exp(2\sigma) = (B + AS^2)^{-2}, \quad (2.2)$$

где A и B - постоянные. Очевидно, что везде можно положить $B = 1$, так как эта константа определяет выбор масштаба.

Зная конформный множитель, легко находим давление как функцию переменной S :

$$\kappa p = 3\beta \left[\frac{2\sigma'}{S} + (\sigma')^2 \right] \exp(-2\sigma). \quad (2.3)$$

Проделав несложные вычисления, получим ожидаемый результат: давление постоянно и зависит только от констант

$$\kappa p = 12A, \quad (2.4)$$

откуда видно, что постоянная A отрицательна (плотность энергии должна быть положительной).

Четырехмерную скалярную кривизну находим по формуле

$${}^4R = 6 \exp(-2\sigma) \left[\sigma'' + \frac{3\sigma'}{S} + (\sigma')^2 \right] = -48A > 0. \quad (2.5)$$

Трехмерная скалярная кривизна в случае с метрикой (1.1) в несопущующей системе отсчета вычисляется с помощью 3-проектора $b_{ik} = u_i u_k - g_{ik}$ ($u^i = e^{-\sigma} b^i$ - 4-скорость; $b_i = S_{,i}$) и равна

$${}^3\hat{R} = -\frac{3\sigma'}{S} \exp(-2\sigma). \quad (2.6)$$

Для физического вакуума эта кривизна принимает вид

$${}^3\hat{R} = 6A(1 + AS^2). \quad (2.7)$$

При $S \rightarrow 0$ ${}^3\hat{R}$ стремится к конечному пределу ($6A$).

Преобразованием $t = S \cosh R$, $r = S \sinh R$ решение с метрикой (1.1) переводится в сопутствующую синхронную систему отсчета, где собственное время определяется как

$$\tau = \int u_\mu dx^\mu = \int \exp[\sigma(S)] dS, \quad (2.8)$$

здесь u^μ - 4-скорость, которая в общем случае не выражается в элементарных функциях (это, по всей видимости, и обуславливает «нежелание» многих работать с конформно-плоскими метриками. Интервал записывается как

$$dS^2 = d\tau^2 - a^2(\tau) (dR^2 + \sinh^2 R d\Omega^2), \quad (2.9)$$

где $a(\tau) = e^\sigma S$ - масштабный фактор.

В нашем случае собственное время легко находится и равно

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{|A|}} \ln \left| \frac{1 + \sqrt{|A|}S}{1 - \sqrt{|A|}S} \right| = \frac{1}{\sqrt{|A|}} \arctan h(\sqrt{|A|}S). \quad (2.10)$$

Выбирая область изменения τ от 0 до ∞ , получим область изменения S : $0 \leq S \leq (1/\sqrt{|A|})$.

Соответствующую скалярную 3-кривизну в сопутствующей синхронной системе отсчета получаем в виде

$${}^3R = -\frac{1}{S^2} (1 - |A|S^2)^2 = -4|A| \sinh^2(2\sqrt{|A|}\tau), \quad (2.11)$$

а интервал записывается в стандартной форме

$$dS^2 = d\tau^2 - \left(\frac{1}{4\sqrt{|A|}} \right) \sinh^2(2\sqrt{|A|}\tau) d\ell^2. \quad (2.12)$$

2.2. $n = 1$, $\beta_0 = -2/3$

Состояние материи: доменные стенки.

Конформный множитель:

$$\exp(2\sigma) = (1 + AS)^{-4}. \quad (2.13)$$

Давление:

$$\kappa p = \frac{8A}{S} (1 + AS^2); \quad (2.14)$$

при этом $A < 0$.

Четырехмерная скалярная кривизна:

$${}^4R = - \left(\frac{36}{S} \right) A (1 + AS^2)^2. \quad (2.15)$$

Трехмерная скалярная кривизна в несопущующей системе отсчета:

$${}^3\hat{R} = \left(\frac{6A}{S} \right) (1 + AS)^3. \quad (2.16)$$

Собственное время:

$$\tau = (|A| (1 + AS))^{-1}. \quad (2.17)$$

Метрический элемент в синхронной системе отсчета:

$$dS^2 = d\tau^2 - A^2\tau^4 d\ell^2. \quad (2.18)$$

2.3. $n = 2$, $\beta_0 = -1/3$

Состояние материи: релятивистские струны.

Конформный множитель:

$$\exp(2\sigma) = S^{2A}. \quad (2.19)$$

Давление:

$$\kappa p = -A(A + 2) S^{-2(A+1)}. \quad (2.20)$$

Четырехмерная скалярная кривизна:

$${}^4R = \frac{6A(A + 2)}{S^{2(A+1)}}. \quad (2.21)$$

Трехмерная скалярная кривизна в несопущующей системе отсчета:

$${}^3\hat{R} = -\frac{3A}{S^{2(A+1)}}. \quad (2.22)$$

Собственное время:

$$\tau = \frac{1}{(A + 1)} S^{(A+1)}. \quad (2.23)$$

Метрический элемент в синхронной системе отсчета:

$$dS^2 = d\tau^2 - [(A+1)\tau] \left(\frac{2A}{A+1} \right) d\ell^2. \quad (2.24)$$

Необходимо отметить, что этот случай является особым как с точки зрения гармонических функций, так и с точки зрения физического содержания получаемой модели: в зависимости от знака и величины постоянной A можно получать как сингулярные, так и несингулярные модели.

2.4. $n = 3, \beta_0 = 0$

Состояние материи: некогерентная пыль (Вселенная Фридмана).
Конформный множитель:

$$\exp(2\sigma) = \left(1 + \frac{A}{S} \right)^4. \quad (2.25)$$

Давление и плотность энергии:

$$p = 0; \quad \varkappa\varepsilon = -\frac{12A}{S^3(1+A/S)^6}. \quad (2.26)$$

откуда видно, что постоянная A отрицательна.

Четырехмерная скалярная кривизна:

$${}^4R = -\frac{12A}{S^3(1+A/S)^6}. \quad (2.27)$$

Трехмерная скалярная кривизна в несопствующей системе отсчета:

$${}^3\hat{R} = -\frac{6A}{S^3(1+A/S)^5}. \quad (2.28)$$

Собственное время:

$$\tau = S - 2A \ln \left| \frac{S}{A} \right| - \frac{A^2}{S}. \quad (2.29)$$

Масштабный множитель в синхронной системе отсчета не выражается непосредственно через собственное время, как и в стандартном подходе (см, например, [14]).

2.5. $n = 4, \beta_0 = +1/3$

Состояние материи: ультрарелятивистский газ.
Конформный множитель:

$$\exp(2\sigma) = (1 + A/S^2)^2. \quad (2.30)$$

Давление:

$$\varkappa p = -\frac{A}{S^4(1+A/S^2)^4}. \quad (2.31)$$

Четырехмерная скалярная кривизна ${}^4R = 0$, что с очевидностью следует из равенства нулю следа тензора энергии-импульса в этом случае.

Трехмерная скалярная кривизна в несопствующей системе отсчета:

$${}^3\hat{R} = -\frac{6A}{S^4(1+A/S^2)^3}. \quad (2.32)$$

Собственное время:

$$\tau = S + \frac{|A|}{S} - \left(\sqrt{|A|} + \frac{1}{\sqrt{|A|}} \right). \quad (2.33)$$

Метрический элемент в синхронной системе отсчета:

$$dS^2 = d\tau^2 - \left(\tilde{\tau} - \frac{4|A|}{\sqrt{\tilde{\tau} - 4|A|}} \right) dl^2; \quad \tilde{\tau} = \tau + \left(\sqrt{A} + \frac{1}{\sqrt{A}} \right), \quad (2.34)$$

из которого видно, что выбор знака перед корнем и значения постоянной будут определяться граничными условиями в конкретной модели, но при больших временах $a^2 \sim \tau$.

2.6. $n = 5$, $\beta_0 = +2/3$

Состояние материи: нерелятивистский вырожденный газ.

Конформный множитель:

$$\exp(2\sigma) = (1 + A/S^3)^{4/3}. \quad (2.35)$$

Давление:

$$\kappa p = -\frac{8A}{S^5(1 + A/S^3)^{10/3}}; \quad (2.36)$$

Четырехмерная скалярная кривизна:

$${}^4R = \frac{12A}{S^5(1 + A/S^3)^{10/3}}. \quad (2.37)$$

Трехмерная скалярная кривизна в несопущующей системе отсчета:

$${}^3\hat{R} = \frac{6A}{S^5(1 + A/S^3)^{7/3}}. \quad (2.38)$$

Собственное время как функция от S не выражается в элементарных функциях.

2.7. $n = 6$, $\beta_0 = +1$

Состояние материи: сверхжесткое состояние.

Конформный множитель:

$$\exp(2\sigma) = (1 + A/S^4). \quad (2.39)$$

Давление:

$$\kappa p = -\frac{12A}{S^6(1 + A/S^4)^3}. \quad (2.40)$$

Четырехмерная скалярная кривизна:

$${}^4R = \frac{24A}{S^6(1 + A/S^4)^3}. \quad (2.41)$$

Трехмерная скалярная кривизна в несопущующей системе отсчета:

$${}^3\hat{R} = \frac{6A}{S^6(1 + A/S^4)^2}. \quad (2.42)$$

Итак, в случае четырехмерного пространства-времени мы имеем семь физически интерпретируемых значений β_0 (уравнений состояния материи, заполняющей пространство-время), допускающих описание создаваемых гравитационных полей (конформных множителей 4-метрики) на языке фундаментальных гармонических функций соответствующих евклидовых пространств. Основные полученные выше данные для четырехмерного пространства-времени для сравнения сведены в Табл.1.

Таблица 1

n	$n - 1$	β_0	Состояние материи	$\exp(2\sigma(\mathbf{S}))$
0	-1	-1	Физический вакуум	$(B + A \cdot S^2)^{-2}$
1	0	-2/3	Доменные стенки	$(B + A \cdot S)^{-4}$
2	1	-1/3	Релятивистские струны	$A \cdot S^{2B}$
3	2	0	Некогерентная пыль	$(B + A/S)^4$
4	3	+1/3	Релятивистский газ	$(B + A/S^2)^2$
5	4	+2/3	Нерелятивистский вырожденный газ	$(B + A/S^3)^{4/3}$
6	5	+1	Сверхжесткое	$(B + A/S^4)$

3. Таблица состояний материи в многомерном пространстве-времени

Теперь мы вновь обратимся к соотношению, связывающему β_0 из уравнения состояния, размерность «опорного» пространства-времени $(N + 1)$ и размерность фундаментальной гармонической функции n . Так как в «опорном» многообразии нам необходимо иметь хотя бы одно временноподобное направление и одно пространственноподобное (чтобы понятие пространства-времени имело смысл), то естественно начать рассмотрение моделей с $N = 1$. Напомним, что для каждого фиксированного N число ассоциированных евклидовых (конформно-евклидовых) пространств, то есть фундаментальных гармонических функций, ограничено и равно $(2N + 1)$.

Полная картина наглядно отражается в виде Табл.2, в которой по горизонтали отложены значения N , а по вертикали - размерность ассоциированного евклидова (конформно-евклидова) пространства n . Отметим некоторые важные, на наш взгляд, моменты, характерные для этой таблицы.

Таблица 2

N/n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	0	-1/2	-2/3	-3/4	-4/5	-5/6	-6/7	-7/8	-8/9	-9/10	-10/11
2	+1	0	-1/3	-2/4	-3/5	-4/6	-5/7	-6/8	-7/9	-8/10	-9/11
3		+1/2	0	-1/4	-2/5	-3/6	-4/7	-5/8	-6/9	-7/10	-8/11
4		+1	+1/3	0	-1/5	-2/6	-3/7	-4/8	-5/9	-6/10	-7/11
5			+2/3	+1/4	0	-1/6	-2/7	-3/8	-4/9	-5/10	-6/11
6			+1	+2/4	+1/5	0	-1/7	-2/8	-3/9	-4/10	-5/11
7				+3/4	+2/5	+1/6	0	-1/8	-2/9	-3/10	-4/11
8				+1	+3/5	+2/6	+1/7	0	-1/9	-2/10	-3/11
9					+4/5	+3/6	+2/7	1/8	0	-1/10	-2/11
10					+1	+4/6	+3/7	+2/8	+1/9	0	-1/11
11						+5/6	+4/7	+3/8	+2/9	+1/10	0

Легко видеть, что только три «состояния» присутствуют во всех размерностях пространства-времени: «физический вакуум», «пыль» и «сверхжесткое состояние». Они взяты в кавычки ввиду того, что физическая интерпретация конкретных значений в различных размерностях требует отдельного рассмотрения. В связи с этим показателен тот факт, что в четырехмерном мире (третий столбец) все «возможные» значения β имеют ясную физическую трактовку и включают в себя все основные состояния вещества, используемые для нахождения космологических решений.

Необходимо указать на то, что гармонические функции одного и того же порядка (другими словами, один и тот же конформный множитель) отвечают различным значениям β_0 в разных размерностях. Тогда на таком языке можно говорить о некотором «унифицировании» типов взаимодействий, так как для любого β_0 (кроме физического вакуума, что также весьма примечательно) найдется такое пространство-время, в котором соответствующий конформный множитель будет описывать модель, заполненную веществом типа пыли с $\beta_0 = 0$.

К интересному заключению можно прийти, обращаясь опять к 4-мерному пространству-времени: переход к 5-мерии «унифицирует» электромагнитное взаимодействие (что, кстати, вполне соответствует подходу Калуцы-Клейна); переход к 6-мерии «унифицирует» состояние вещества с $\beta_0 = +2/3$, которое справедливо для всех идеальных систем: бозонных и фермионных (см, например, [15]). То есть речь идет об электрослабом взаимодействии. Введение

7-мерия «превращает в пыль» вещество со сверхжестким уравнением состояния в 4-мерии, иначе говоря, когда в 4-мерии реализуется сильное взаимодействие. Это согласуется с результатами Ю.С. Владимирова [16], который показал, что в рамках подхода Калуцы-Клейна для объединения гравитационного и электрослабого взаимодействия достаточно 6-мерного пространства-времени, а для объединения гравито-электро-сильных взаимодействий - 7-мерного пространства-времени с одним временноподобным направлением.

С другой стороны, одному и тому же значению β_0 могут соответствовать различные порядки фундаментальных гармонических функций, то есть различные конформные множители в зависимости от размерности пространства-времени. Так $\beta_0 = +1/3$ описывается гармонической функцией четвертого порядка в 4-мерии, гармонической функцией восьмого порядка в 7-мерии, двенадцатого порядка в 10-мерии и так далее. Конечно, нужно помнить о том, что конкретное значение β_0 отвечает различным физическим условиям в различных (в смысле размерности) мирах.

Существенным моментом такого подхода является, на наш взгляд, возможность описания моделей конформно-плоской Вселенной, заполненной веществом с произвольным β_0 .

4. Заключение

В настоящей работе в рамках многомерного пространства-времени с одним временноподобным направлением рассмотрено получение конформно-плоских космологических моделей как точных решений уравнений тяготения для разных уравнений состояния с линейной связью между давлением и плотностью энергии. При этом тензор энергии-импульса взят как обобщение ТЭИ в приближении идеальной паскалевой жидкости в четырехмерии. Частным случаем такого ТЭИ является ТЭИ некогерентной пыли с нулевым давлением, связанный с открытой моделью Вселенной Фридмана. Оказывается, что введение такого уравнения состояния приводит к выявлению некоторого дискретного физически интерпретируемого набора уравнений состояния, для которых конформные множители тесно связаны с гармоническими функциями, являющимися решениями уравнений Лапласа в многомерных евклидовых пространствах целой размерности. Размерность этих пространств, в свою очередь, определяется конкретным уравнением состояния материи.

Для четырехмерных пространств-времен приведена соответствующая таблица, позволяющая проследить связь между дискретным набором линейных уравнений состояния, размерностью вспомогательного евклидова пространства и функциональным видом конформных множителей открытых космологических моделей, связанных с гармоническими функциями, удовлетворяющих уравнениям Лапласа в этих вспомогательных евклидовых пространствах. При этом видно, что пространственное трехмерие ограничивает выбор дискретных физически интерпретируемых уравнений состояния для получения точных решений уравнений тяготения, связанных с гармоническими функциями. Поэтому, с одной стороны, с заданной наперед точностью можно любой рациональной дробью аппроксимировать любое линейное уравнение состояния, а, с другой, только расширив пространство-время до необходимой размерности, можно записать точное решение многомерных уравнений Эйнштейна, связав его с гармоническими функциями.

При увеличении пространственной размерности N ($N > 3$) такая возможность появляется для любого линейного уравнения состояния с рациональным коэффициентом пропорциональности. Для таких пространств-времен приведена аналогичная таблица, но без фиксации размерности пространственной гиперповерхности. При этом каждому значению пространственной размерности N отвечают $2N + 1$ линейных уравнений состояний. Эта таблица демонстрирует возможности для каждого такого уравнения состояния с рациональным коэффициентом пропорциональности между давлением и плотностью энергии при построении любой открытой космологической модели с конформно-плоской метрикой, но в соответствующем пространстве времени с размерностью больше четырех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.М., Савельев Е.В. Точные решения для конформно-плоской Вселенной. I. Эволюция модели как задача о движении частицы в силовом поле // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2014. №1. С.37–46.
2. Баранов А.М., Савельев Е.В. Сферически-симметричное светоподобное излучение и конформно-плоские пространства-времена // Изв.вузов (Физика). 1984. №7. С. 32–35.
3. Baranov A.M., Saveljev E.V. Spherically symmetric lightlike radiation and conformally flat space-times // Russ. Phys. J. 1984. – V. 27. – No 7. – P.569–572.

4. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. 563 с.
5. Мицкевич Н.В. Физические поля в общей теории относительности. М.: Наука, 1969. 326 с.
6. Зельманов А.Л. Кинеметрические инварианты и их отношение к хронометрическим инвариантам в теории тяготения Эйнштейна // ДАН СССР. 1973. Т.209. № 4. С. 822–825.
7. Владимиров Ю.С. Системы отсчета в теории гравитации. М.: Энергоиздат, 1982. 256 с.
8. Mitskievich N.V. Relativistic Physics in Arbitrary Reference Frames. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2006.
9. Баранов А.М. Конформно-галилеева 4-метрика и кинеметрические системы отсчета // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2013. №.1. С.37–43.
10. Баранов А.М., Савельев Е.В. Конформно-плоская открытая модель Вселенной с произвольной функцией состояния // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2013. №.4. С.22–27.
11. Фридман А.А. О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной // УФН. 1963. Т. 80. Вып. 3. С.447–452.
12. Тиман А.Ф., Трофимов В.Н. Введение в теорию гармонических функций, М.: Наука, 1968. 207 с.
13. Баранов А.М., Савельев Е.В. Об одном способе описания конформно-плоского мира // Гравитация и электромагнетизм: сб. статей, Минск: Университетское, 1988. С. 26–29.
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988. 512 с.
15. Балеску З. Равновесная и неравновесная статистическая механика. М.: Мир, 1978. Т.1–2.
16. Владимиров Ю.С. Размерность физического пространства-времени и объединение взаимодействий. М.: Изд-во МГУ, 1987.

Поступила в редакцию 01.06.2014

Баранов Александр Михайлович, д. ф.-м. н., профессор,
Красноярский государственный педагогический университет им.В.П.Астафьева,
660049, Россия, г.Красноярск, ул. Ады Лебедевой, 89 ;
Сибирский государственный технологический университет, 660049, Россия, г.Красноярск, пр.Мира, 82.
E-mail: alex_m_bar@mail.ru; Baranov@stfi.ru

Савельев Евгений Викторович, к. ф.-м. н., доцент,
ООО «ПРОФИЛЬ - 2С», 123060, Москва, 1-ый Волоколамский проезд, 15/16
E-mail: editor@stfi.ru

A. M. Baranov, Eu. V. Saveljev

Exact solutions of the conformally flat Universe. II. The linear equation of state and multidimensional space-times

Keywords: the open cosmological models, exact solutions of the gravitation equations, multidimensional space-times, conformally flat spaces, linear equation of state, equation of Laplace.

PACS: 04.20.-q; 98.80.Jk

The finding problem of conformally flat cosmological models as exact solutions of the equations of gravitation for different equations of state with linear connection between pressure and energy density is demonstrated within the limits of multidimensional space-time with one time-like direction. In this case the energy-momentum tensor (EMT) is taken as generalisation of EMT in an approach of the perfect Pascal fluid for space-time with four dimensions. The special case is EMT for an incoherent dust with zero pressure is related to the open model of Friedman's Universe.

It is claimed that such approach leads to an identification of some discrete set of equations of state for which conformal factors are connected with the harmonic functions as solutions of the Laplace equations in multidimensional Euclidean spaces of an integer dimensionality. Dimensionality of these spaces, in turn, is defined by a concrete equation of state. For four-dimensional space-times the corresponding table is constructed. This table allows to trace connection between a discrete set of linear equations of state and dimensionality of the auxiliary Euclidean spaces and also the functional expression of conformal factors of the open cosmological models related to potential functions, which are solutions of the Laplace equations in these auxiliary Euclidean spaces.

Thus it can be seen that three dimensional spatial-like manifold restricts a selection of discrete physically interpreted equations of state for the finding of exact solutions of the gravitation equations related to potential functions. Therefore, on the one hand, any linear equation of state can be approximated with any accuracy

by any rational fraction. On the other hand, the exact solution of the many-dimensional equations of Einstein can be found only related via to potential functions when the spatial extension of space-time will be made up to necessary multidimension. Such possibility appears for any linear equation of state with a rational constant of proportionality at growth of the space dimensionality N ($N > 3$). For such space-times the similar table is constructed, but without fixing of dimensionality of a spatial hypersurface. Here each value of spatial dimensionality N corresponds to $2N + 1$ of linear equations of state. This table demonstrates the possibilities for each such equation of state with a rational constant of proportionality between pressure and density of energy under construction for any open cosmological model with the conformally flat metric, but in corresponding space-time with dimensionality more than four.

REFERENCES

1. Baranov A.M. Saveljev E.V. Exact solutions of the conformally flat Universe. I. The evolution of model as the problem about a particle movement in a force field, *Space, Time and Fundamental Interactions (STFI)*, 2014, no.1, pp.37–46.
2. Baranov A.M. Saveljev E.V. Spherically symmetric lightlike radiation and conformally flat space-times, *Izv. vuz. (Fizika)*, 1984, no.7, pp. 32–35.
3. Baranov A.M., Saveljev E.V. Spherically symmetric lightlike radiation and conformally flat space-times, *Russ. Phys. J.* 1984. – V. 27. – No 7. – P.569–572.
4. Fock V.A. *The Theory of Space, Time and Gravitation*, New York: Pergamon, U.S.A., 1964 (2nd edition).
5. Mitskievich N.V. *Physical Fields in General Relativity*, Moskow: Nauka, 1969, 563 p. (in Russian).
6. Zelmanov A.L. Kinematic Invariants And Their Relation To Chronometric Invariants of Einstein Theory Of Gravity, *DAN USSR*, 1973, vol. 209, no.4, pp. 822–825.
7. Vladimirov Yu.S. *Reference Frames in the Gravitation Theory*, Moscow: Energoizdat, 1982, 256 p.(in Russian)
8. Mitskievich N.V. Reference frames and the constructional approach to observed magnitudes in general relativity, *Einstein collected book, 1971*, Moscow: Nauka, 1972, pp.67–87.
9. Baranov A.M. Conformally Galilean 4-metric and Kinematic Reference Frames, *Space, Time and Fundamental Interactions (STFI)*, 2013, no.1, pp.37–43.
10. Baranov A.M. Saveljev E.V. Conformally flat model of the open Universe with an arbitrary function of state, *Space, Time and Fundamental Interactions (STFI)*, 2013, no.1, pp.22–27.
11. Friedman A.A. Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes, *Z. Phys.*, 1924, vol. 21, Lief., no. 1, pp.326–333.
12. Timan A.F., Trofimov V.N. *Introduction in theory of harmonic functions*, Moscow: Nauka, 1968, 207 p.
13. Baranov A.M. Saveljev E.V. On one way of description of conformal flat world, *Gravitation and electromagnetism: collected articles*. Minsk: University Press, 1988, pp.26–29.
14. Landau L.D., Lifshitz E.M. *The classical Theory of Fields*, Moskow: Nauka, 1988, 512 p. (in Russian).
15. Balescu R. *Equilibrium and nonequilibrium statistical mechanics*, New York-London-Sydney-Toronto, 1975, 742 p.
16. Vladimirov Yu.S. *Dimensionality of physical space-time and unification of interactions*, Moscow: Moscow State University Press, 1987, 215 p. (in Russian).

Received 01.06.2014

Baranov Alexandre Mikhailovich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor,
Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P.Astaf'ev,
89 Ada Lebedeva St., Krasnoyarsk, 60049, Russia;
Siberian State Technological University, 82 Mira Av., Krasnoyarsk, 60049, Russia.
E-mail: alex_m_bar@mail.ru; Baranov@stfi.ru
©Baranov A.M.

Saveljev Eugene Viktorovich, Candidate of Physics and Mathematics, Assistant Professor,
OOO "PROFILL - 2S 15/16 1-st Volokolamsk passage, Moscow, 123060, Russia.

E-mail: editor@stfi.ru
©Saveljev Eu.V.

А. Б. Балакин, Л. В. Грунская

ПРЕДИСЛОВИЕ: АКСИОННАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

Научная дискуссия, о которой пойдет речь, началась в 1993 году на 8-ой Российской гравитационной конференции в Пущино в процессе обсуждения данных из обновленного каталога двойных релятивистских астрофизических систем. Для обозначения этих объектов часто применяется термин "гравитационно-волновые маяки" поскольку с большой точностью известны их угловые координаты, периоды вращения и годовые сдвиги периодов вращения, а потому существуют прогнозы, что эти объекты должны излучать периодические гравитационные волны с четко фиксированными частотными характеристиками. Ключевым моментом в дискуссии оказался тот факт, что частотный диапазон, в котором излучают ГВ-маяки (10^{-3} – 10^{-6} Гц), хорошо известен в физике земной атмосферы как ИНЧ-диапазон (Инфра-Низко-Частотный). Дело в том, что ИНЧ-вариации электрического и магнитного поля в приземном слое в течение предшествующих десятилетий детально изучались на экспериментальном полигоне Владимирского университета, и нам показалось логичным попытаться обнаружить следы ИНЧ-сигналов на частотах ГВ-маяков в имеющихся спектрах вариаций электрического и магнитного полей. За прошедшие после этого 20 лет выяснилось, что проблема поиска таких сигналов намного сложнее, чем тогда казалось, но зато теперь понятно, насколько это интересная и даже интригующая задача и для теоретиков, и для экспериментаторов. Краткому описанию достижений и проблем, связанных с организацией данных экспериментальных исследований во Владимирском университете, посвящена **первая** из четырех статей, публикуемых в данном номере журнала.

Когда первые попытки обнаружить на Владимирском полигоне электрические сигналы на частотах ГВ-маяков среди вариаций поля в приземном слое атмосферы дали некие оптимистические результаты, многие коллеги отнеслись к ним скептически, утверждая, что электродинамическая система Земли крайне сложна и информационно насыщена, так что из околосреднего информационного резервуара с высокой долей вероятности можно извлечь сигнал на любой заданной частоте. В ответ на эту критику Владимирские коллеги продемонстрировали, что после накопления и специальной обработки наблюдаемые сигналы можно рассматривать как уединенные в спектральной области, т.е., сдвиг по частоте влево и вправо от удвоенной частоты вращения двойной системы приводит к резкому спаду амплитуды сигнала. Технология обработки электрических сигналов ИНЧ диапазона существенно отличается от стандартной, поэтому **во второй** из четырех статей, представленных ниже, обсуждаются специальные методики обработки сигналов, применяемых Владимирской экспериментальной группой.

Оценка амплитуды обнаруженных сигналов также является предметом пристального внимания со стороны критиков. В многочисленных дискуссиях конца 90х годов было высказано пожелание в первую очередь доказать, что по разработанной методике можно зарегистрировать электрический сигнал, индуцированный приливными изменениями гравитационного потенциала Земли, которые в силу относительной близости Луны на несколько порядков интенсивнее сигналов от удаленных ГВ-источников. Эти эксперименты были проведены с подобающей тщательностью, а их результаты кратко обсуждаются **в третьей** статье из четырех, представленных ниже.

В третьей же статье приведены результаты исследований электрических сигналов на частотах гравитационно-волновых маяков. Многих критиков результат шокировал, поскольку неожиданно большими оказались амплитуды обнаруженных сигналов. Тогда в силу вступил последний контраргумент. Он состоит в том, что для амплитуды ГВ, оцененной в рамках Эйнштейновской гравитации, амплитуда электрического ИНЧ-сигнала, индуцированного этой ГВ, обязана быть на десять порядков ниже зарегистрированного сигнала, если расчет производится в рамках стандартной электродинамики.

Очевидно, что есть только один способ поспорить с контраргументом типа: «Этого не может быть, потому, что этого не может быть никогда» (А.П. Чехов, из рассказа «Письмо ученому соседу») – следует найти и предъявить модель взаимодействия электромагнитного и гравитационного полей, которая допускала бы аномальное усиление сигнала. Именно о таких моделях идет речь в **четвертой** статье, которая опирается на точные решения электродинамических уравнений; в ней затронуты некоторые теоретические проблемы, связанные с интерпретацией представленных экспериментальных результатов в рамках концепции поиска следов аксионной темной материи.

УДК 550.379, 550.389

*Л. В. Грунская,¹ В. А. Ефимов,² А. А. Закиров,³ А. Н. Золотов,⁴ Д. В. Рубай,⁵
И. А. Лещёв⁶*

МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ⁷

Электромагнитное поле Земли (ЭМПЗ) представляет собой высокочувствительный вид переносчика информации о процессах земных и космических. Исследования в инфранизкочастотном диапазоне различных процессов требуют разнесенного в пространстве мониторинга электромагнитных полей, так как для достоверного обнаружения изучаемого ИНЧ процесса в таком частотном диапазоне его необходимо зарегистрировать на ряде разнесенных в пространстве (на сотни и тысячи километров) станциях. Цели проводимых и обсуждаемых в данной статье исследований связаны с изучением структуры сигналов, вызванных такими геофизическими процессами в электромагнитном поле пограничного слоя атмосферы как лунно-солнечные приливы, сейсмические процессы.

Ключевые слова: электромагнитное поле Земли, инфранизкочастотный диапазон, мониторинг электромагнитных полей, геофизические процессы

PACS: 52.60.Pw, 91.25.-r

Введение

Человек живет, работает и стремится постичь окружающий мир в условиях резонатора Земля-ионосфера, в его электродинамической системе. В таком резонаторе распространяются электромагнитные волны широкого частотного диапазона. Наибольший интерес представляет собой инфранизкочастотный диапазон (ИНЧ — ниже 30 Гц), порождаемый в основном грозowymi очагами всей Земли. В указанный диапазон вносят вклад и вземные источники — приливные процессы, спровоцированные Луной и Солнцем, космические ИНЧ процессы. Интерес к изучению электромагнитных полей инфранизкочастотного диапазона связан с их широким спектром физических механизмов возбуждения — от земных до космических. ИНЧ вариации электромагнитных полей распространяются в резонаторе Земля-ионосфера практически без затухания, проникают на большие глубины в землю и воду.

В электродинамической системе Земли можно выделить гидродинамическую подсистему (магма), эластодинамическую подсистему (земная кора), газодинамическую (атмосфера), плазменную (ионосфера), и электродинамическую (геомагнитное поле и естественное электрическое поле).

Электромагнитное поле Земли (ЭМПЗ) представляет собой высокочувствительный вид переносчика информации о процессах земных и космических. Человек достаточно хорошо освоил возможности электромагнитных полей. Многие процессы в природе невозможно было бы изучить, не используя ЭМПЗ — это так называемые косвенные методы исследования, когда в электромагнитном поле Земли пограничного слоя атмосферы можно выделить воздействия земных и вземных источников различной природы, когда прямыми методами обнаружение их практически невозможно (например, предвестники землетрясений).

Стремясь создать уникальные по конструкции и чувствительности приборы, мы не должны забывать о созданном самой природой «приборе», действительно уникальном по своей неповторимой «конструкции» и чувствительности — электромагнитном поле.

Исследования в инфранизкочастотном диапазоне различных процессов требуют разнесенного в пространстве мониторинга электромагнитных полей, так как для достоверного обнаружения изучаемого ИНЧ процесса в таком частотном диапазоне его необходимо зарегистрировать на ряде разнесенных в пространстве (на сотни и тысячи километров) станциях.

¹ E-mail: grunsk@vlsu.ru

² E-mail: vefimov@vlsu.ru

³ E-mail: cheeter33@mail.ru

⁴ E-mail: zolotovan@vlsu.ru

⁵ E-mail: GRATISH@yandex.ru

⁶ E-mail: i.a.leshchew@gmail.com

⁷ Работы осуществлены при поддержке Государственного Задания 2014/13, 2871, гранта РФФИ № 14-07-97510/14.

Цели проводимых и обсуждаемых в данной статье исследований связаны с изучением структуры сигналов, вызванных такими геофизическими процессами в электромагнитном поле пограничного слоя атмосферы как лунно-солнечные приливы, сейсмические процессы.

1. Физические механизмы возбуждения вариаций электрических и геомагнитных полей в резонаторе Земля-ионосфера

Во многих радиофизических задачах нижнюю атмосферу рассматривают как тонкий диэлектрический слой, ограниченный сверху (ионосфера) и снизу (земля) сравнительно хорошими проводниками [1]. В таком сферическом волноводе распространяются радиоволны различных диапазонов и верхняя граница частот волноводного канала определяется дисперсионными свойствами ионосферы, а нижняя граница частот не существует, т.е. в волноводе Земля-ионосфера могут распространяться радиоволны сколь угодно низкой частоты, вплоть до постоянного тока [1]. Затухание в волноводном канале на низких частотах очень мало, например, для $f = 10$ Гц ($\lambda = 30$ тыс. км) оно составляет около 0.2 дБ/тыс.км [1–3].

Вариации электрического поля в промежутке Земля-ионосфера могут возбуждаться двумя типами естественных источников — земными и космическими. Основным источником электромагнитной энергии инфранизкочастотного (ИНЧ — ниже 30 Гц) диапазона являются грозовые разряды [4, 5]. В работах [1, 5] показано, что средние за год вариации электростатического поля Земли связаны со средними за год суточными вариациями площади мировых грозовых очагов. Это так называемый Шумановский фон является откликом резонатора Земля-ионосфера на всю совокупность грозовых разрядов, возникающих на земном шаре.

В анализируемый диапазон частот попадают сейсмогравитационные и собственные колебания Земли. Теория сейсмoeлектродинамики (СЭД) описывает возбуждение электромагнитных сигналов, коррелирующих с землетрясениями. Поиск таких сигналов сопряжен с немалыми трудностями. Обнаружимость сейсмoeлектромагнитных сигналов доказана наблюдениями в Японии [6] и более ранними наблюдениями на Камчатке [7]. Вопрос о преобразовании механической энергии очага в энергию электромагнитного поля остается еще не вполне ясным.

Установлено, что в структуре геофизических полей присутствуют квазирегулярные периодичности различной длительности. Они могут быть результатом воздействия на геофизическую среду таких внешних процессов, как лунно-солнечные приливы, неравномерность угловой скорости вращения Земли, вариации солнечной активности и т.д. [8]. Одна из причин появления периодичностей — результат воздействия на геофизическую среду лунно-солнечных приливов.

В литературе достаточно широко рассматриваются крупномасштабные колебания атмосферы, возникающие в результате а) действия сил притяжения Луны и Солнца и б) теплового воздействия Солнца. Приливом обычно называются колебания, возбуждающиеся в результате действия обоих этих факторов, а термическим приливом — колебания, возникающие в результате нагревания. Приливные колебания на больших высотах оказались наиболее заметной компонентой общего изменения давления и плотности, причем настолько значительной, что без их знания невозможен точный расчет движения искусственных тел в верхней атмосфере. Это обусловило большой интерес и непрерывно растущее число публикаций как по наблюдениям, так и по теории атмосферных приливов. Оценка степени воздействия атмосферных приливов на электромагнитные поля в резонаторе Земля-ионосфера при этом играет важную роль.

Геомагнитное поле Земли представляет собой совокупность ряда полей, вызванных различными источниками: магнитными свойствами ядра Земли; горные породы, залегающие в верхних слоях земной коры, обладающие ферромагнитными свойствами. Принято наблюдаемое геомагнитное поле делить на две части — главное магнитное поле и его вековые вариации, имеющие своим источником внутренние причины, и переменное геомагнитное поле, имеющее внешнее происхождение. Переменное магнитное поле по существу является не только магнитным но и электрическим, поэтому часто его называют общим термином — электромагнитное поле Земли [16].

В вариациях геомагнитного поля, регистрируемых экспериментально, мы и выделяем воздействие приливных вариаций, вызванных лунной гравитацией. В таблице 1 представлены изучаемые нами источники вариаций электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы в ИНЧ диапазоне.

2. Система мониторинга электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы на разнесенных в пространстве станциях

За период 1999–2014 годы создана система многоканального синхронного мониторинга электрического и геомагнитного полей на разнесенных в пространстве станциях: физический экспериментальный полигон ВлГУ; станция на оз. Байкал Института солнечно-земной физики СО РАН; станция в п. Паратунка (Камчатка), Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; станция в г. Обнинск на базе научно-производственного объединения «Тайфун» (рисунок 1). Формируются базы экспериментальных данных по разнесенным в пространстве станциям [10–15]. На всех указанных станциях регистрации вертикальной составляющей напряженности электрического поля пограничного слоя атмосферы осуществляются датчиками разработки Владимирского государственного университета.

Для достоверной интерпретации получаемых данных по электрическому полю приземного слоя также использованы данные Гидрометеорологической службы: базы данных электрического поля приземного слоя атмосферы по станциям: Душети (1967–1980 гг.), Воейково (1966–1995 гг.), Верхнее Дуброво (1974–1995 гг.), а также базы экспериментальных данных японских станций геомагнитного поля: Какиока (1913–2006 гг.), Мемамбецу (1950–1999 гг.).

Создание многопунктной системы синхронных регистраций электромагнитного поля пограничного слоя атмосферы с разнесением в пространстве на десятки и сотни километров систем регистрации позволяет исследовать воздействие ряда геофизических и астрофизических процессов.

Основной экспериментальной базой проводимых исследований является физический экспериментальный полигон ВлГУ, расположенный в 40 км от г. Владимира на территории 4 га и служащий для непрерывных синхронных регистраций электрического и геомагнитного полей в ИЧ диапазоне. Комплекс приемных антенн включает в себя антенны наземного типа, подземного и подводного типа, магнитные антенны (феррозондовые магнитометры), флюксометры для измерения электростатического поля в приземном слое, систему графитовых электродов, метеокомплекс [10–15].

На экспериментальном полигоне ВлГУ за период 1972–2007 годы создана станция многоканальной синхронной регистрации, отслеживания, хранения и обработки информации по электромагнитному полю приземного слоя атмосферы с тестированием и калибровкой аппаратуры с помощью ЭВМ. Система предназначена для автоматического сбора информации с датчиков и их калибровки. Система обеспечивает синхронное преобразование входного сигнала, цифровую фильтрацию помех, аналого-цифровое преобразование сигналов с приемных каналов, помехозащищенную посылку данных в центральный пульт сбора, управляемую программно (в цифровом коде) генерацию стабильного низкочастотного сигнала для калибровки датчиков, а также отсчетов точного времени при помощи термостатированного генератора и синхронизацию моментов измерений с текущим временем.

За 2010–2013 годы осуществлена модернизация приемно-регистрирующего комплекса физического полигона, которая возникла в связи с необходимостью обеспечения удаленного доступа к информации, получаемой по датчикам полигона, а также в связи с необходимостью обеспечения системы сбора данных отказоустойчивым промышленным компьютером и системой АЦП повышенной надежности. На рисунке 1 дана схема расположения приемно-регистрирующих пунктов, расположенных по территории России.

Созданы базы экспериментальных данных:

1. Физический экспериментальный полигон ВлГУ (базы данных электрического поля, геомагнитного поля, температуры, давления, влажности, радиационного фона): 1998–2014 гг.
2. Обнинск, Научно-производственное объединение «Тайфун»: базы данных электрического поля приземного слоя атмосферы 2008–2009 гг. (датчик ВлГУ).
3. Байкал, п. Листвянка: базы данных электрического поля приземного слоя атмосферы — 2006–2013 гг. (датчик ВлГУ).
4. Байкал, ст. Хулугайша: базы данных электрического поля приземного слоя атмосферы 2007–2009 гг. (датчик ВлГУ).
5. Байкал, п. Монды: базы данных электрического поля приземного слоя атмосферы 2007–2008 гг. (датчик ВлГУ).

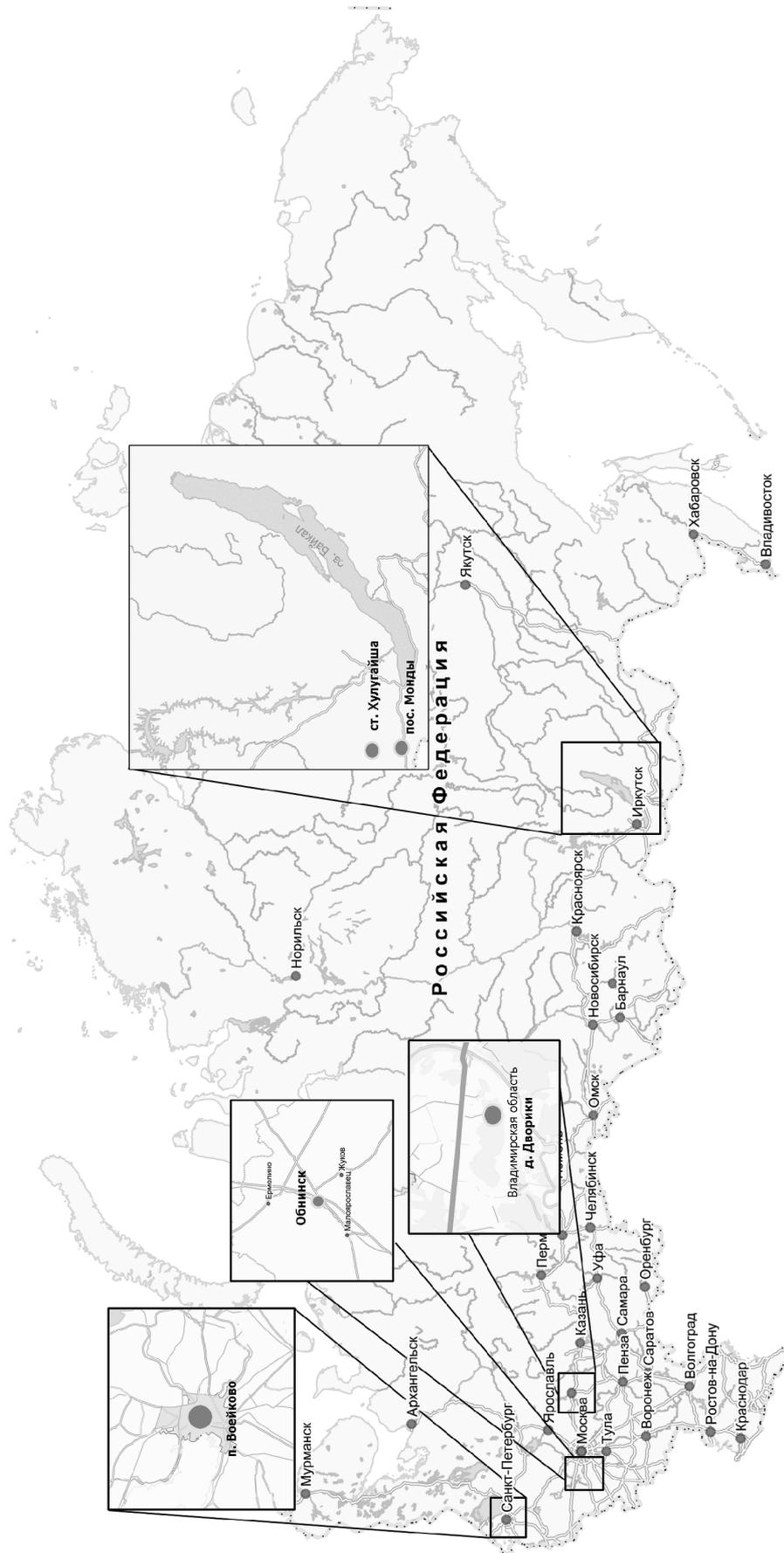


Рис. 1. Система разнесенного в пространстве мониторинга E_z

Таблица 1. Каталог геофизических источников сигналов ИНЧ диапазона

№	Название источника	Частота, 10^{-5} Гц	Период, ч
1	Прилив M_f	0.0890285754845	312.0115
2	Прилив Q_1	1.08014899978	25.71(6)
3	Прилив P_1	1.154201292705	24.066666666
4	Суточное вращение Земли Ω	1.160576156427	23.934472222
5	Прилив K_1	1.160631383473	23.933333333
6	Прилив N_2	2.19587176108	12.65
7	Прилив M_2	2.237136465324	12.466666666
8	2Ω	2.321155006731	11.967222222
9	Прилив K_2	2.321262766945	11.966666666
10	3Ω	3.481732510098	7.9781481481
11	4Ω	4.642310013464	5.9836111111
11	5Ω	5.80288751683	4.78688888887
12	6Ω	6.963465020196	3.989074074072
13	7Ω	8.124042523562	3.419206349205
14	8Ω	9.284620026928	2.991805555554
15	Период глобальных осцилляций Солнца	10.41666666666	2.666666666666
16	9Ω	10.44519753029	2.659382716049
17	10Ω	11.60577503366	2.393444444443
18	Период глобальных осцилляций Солнца	23.8095238095	1.166666666666
19	Период глобальных осцилляций Солнца	28.7356321839	0.966666666666
20	Собственные колебания Земли S_2	30.93	0.897166666666
21	Прилив O_1	1.075921027515	25.8176
22	Прилив M_1	1.11680819445	24.8724
23	Прилив J_1	1.2043449074	23.0646
24	Прилив OO_1	1.462806134	18.9891
25	Прилив $2N_2$	1.9389513889	14.3261
26	Прилив L_2	2.2770266607	12.1991
27	Прилив S_1	1.157407	24
28	Прилив S_2	2.314814	12
29	Прилив S_3	3.472222	8
30	Прилив S_4	4.629629	6

6. Камчатка, п. Паратунка: базы данных электрического поля приземного слоя атмосферы 2007–2014 гг. (датчик ВлГУ).
7. Карпогоры, Архангельская область, метеорологическая станция ИЗМИРАН: базы данных геомагнитного поля 2011–2012 гг.
8. Баксанское ущелье, Центральный Кавказ, метеорологическая станция ИЗМИРАН: базы данных геомагнитного поля 2010–2012 гг.

На рисунках 2–4 приведены примеры синхронных регистраций электрического поля по разнесенным в пространстве станциям.

3. Спектр задач, решаемых с помощью разнесенного в пространстве мониторинга электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы Земли

Цели проводимых исследований связаны с изучением структуры сигналов в спектральной и временной областях, вызванных такими геофизическими процессами в электромагнитном поле пограничного слоя атмосферы Земли как лунно-солнечные приливы, сейсмические процессы, периоды глобальных осцилляций Солнца, суточное вращение Земли, собственные колебания Земли (таблица 1). Осуществляются исследования электромагнитных полей в ИНЧ диапазоне и анализируются все возможные источники периодических процессов данного частотного диапазона.

Один из интересных геофизических процессов — приливное воздействие Луны на электродинамическую структуру Земли. Воздействие лунной гравитационной силы на электромагнетизм

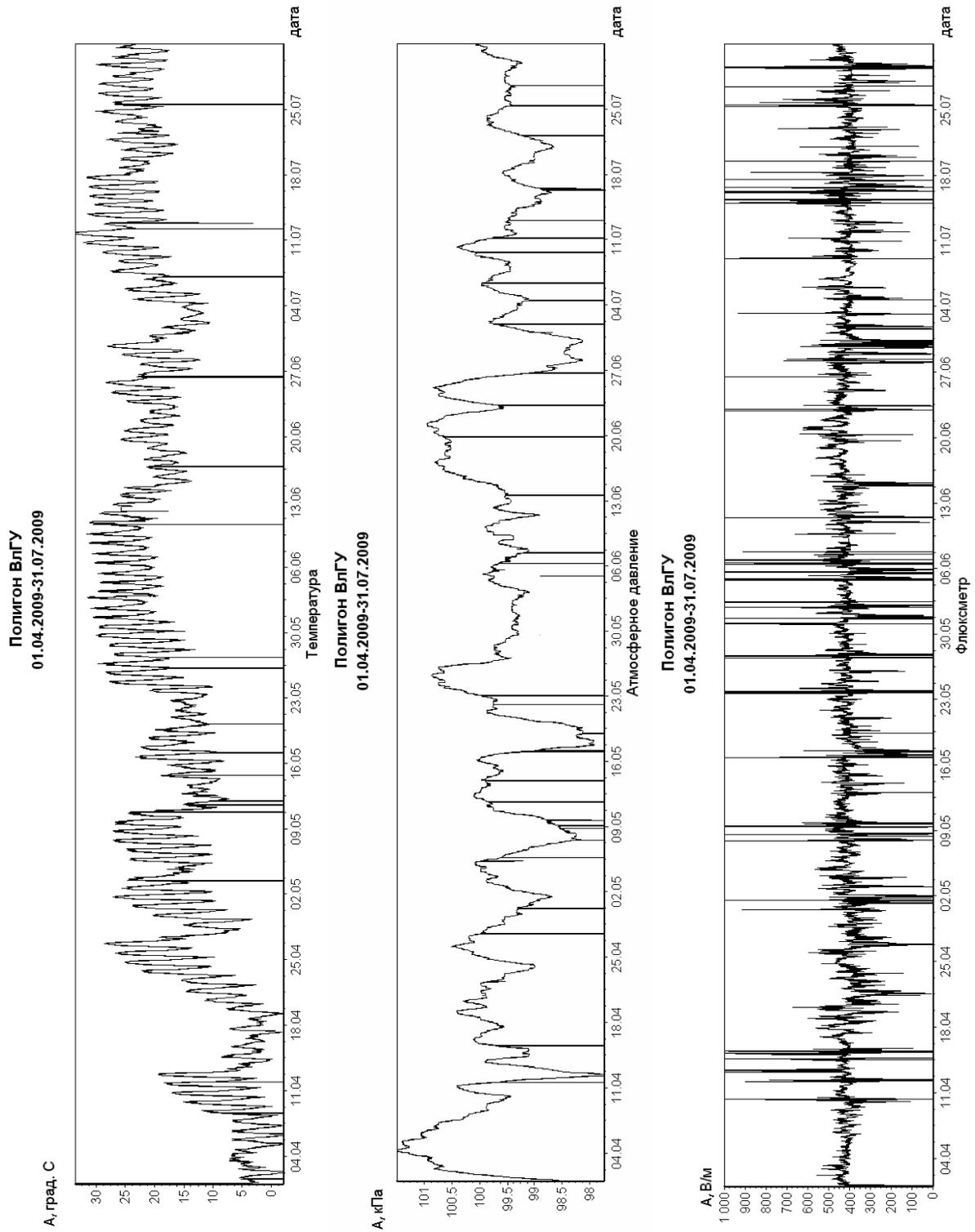


Рис. 2. Примеры экспериментальных данных мониторинга электрического поля пограничного слоя атмосферы на станции ВлГУ

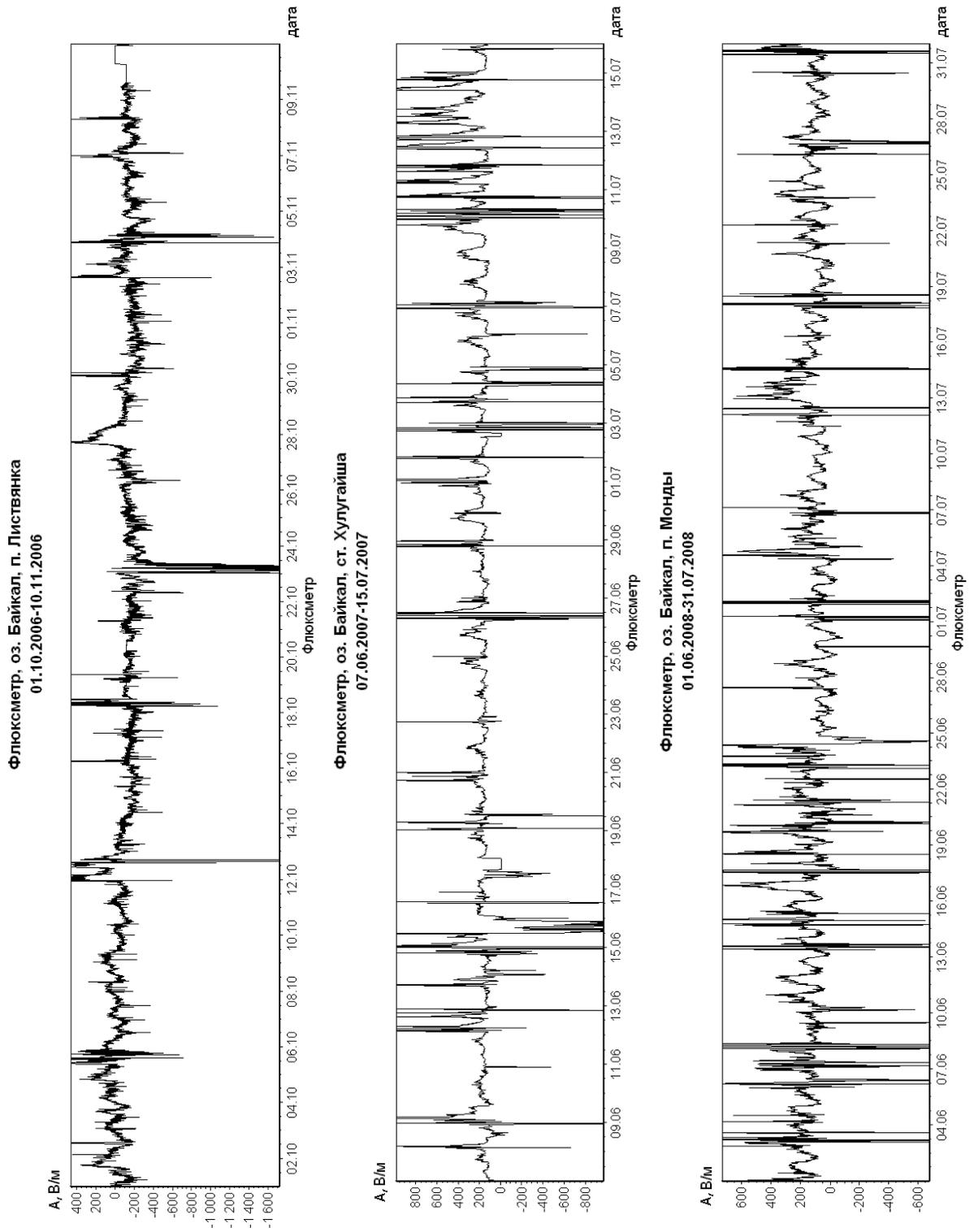


Рис. 3. Примеры экспериментальных данных мониторинга электрического поля пограничного слоя атмосферы на озере Байкал (п. Монды, ст. Хулугайша, п. Листвянка)

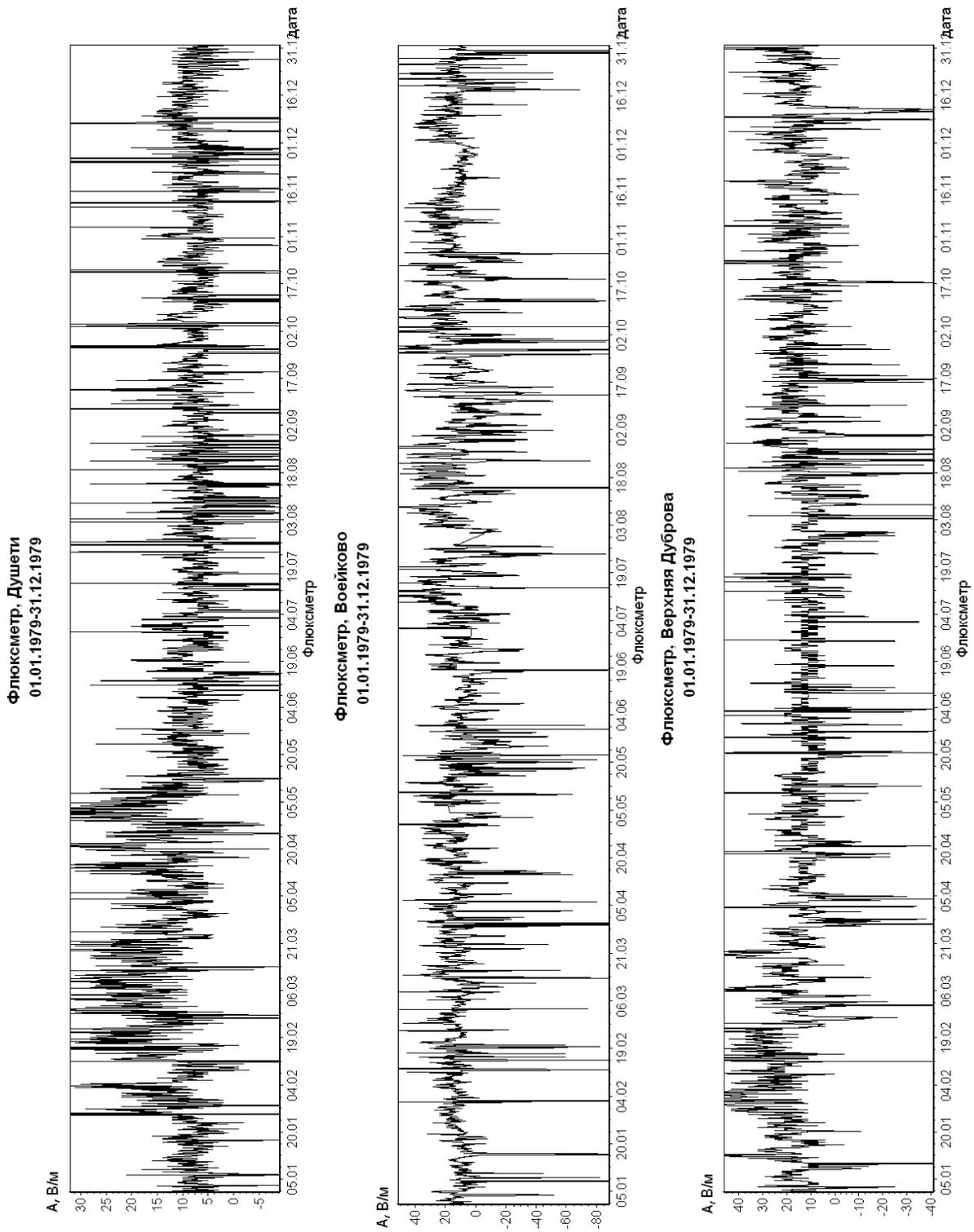


Рис. 4. Примеры синхронных данных мониторинга электрического поля пограничного слоя атмосферы на станциях Гидрометеорологической службы (п. Воейково, Верхнее Дуброво, Душети)

Земли интересно как с точки зрения изучения приливных сил и их воздействий, так и в плане фундаментальных исследований взаимосвязи полей различной природы (гравитационных и электромагнитных).

В настоящее время приливной эффект исследуется в гравиметрии, в колебательной структуре реализаций геофизических полей, в записях компонент магнитного поля Земли, в электрическом поле ионосферы и приземного слоя.

Таким образом, существует как теоретическая информация о моделях возникновения приливного эффекта в электрическом поле ионосферы, так и экспериментальная информация о наличии значительного приливного эффекта на ионосферных высотах. Экспериментальный и теоретический анализ особенностей воздействия приливного эффекта на электрическое поле в приземном слое атмосферы потребовал своего развития.

На основании аналитического обзора публикаций были сформулированы основные проблемы и задачи, возникающие при анализе воздействия приливов на электрическое поле приземного слоя атмосферы: разработка модели проникновения электрического поля, возникающего на уровне ионосферы под действием приливов, в приземный слой атмосферы с учетом бесконечной проводимости земной коры; анализ статистических характеристик вариаций электрического поля приземного слоя атмосферы на больших массивах данных; оценка амплитуд электрического поля на частотах лунно-солнечных приливов; разработка системы мониторинга электрического поля приземного слоя в сети разнесенных в пространстве станций; осуществление длительных регистраций электрического поля в приземном слое атмосферы в сети разнесенных в пространстве на десятки и тысячи километров станций, обеспеченных временной синхронизацией.

Существует как теоретическая информация о моделях возникновения приливного эффекта в электрическом поле ионосферы, так и экспериментальная информация о наличии значительного приливного эффекта на ионосферных высотах. Экспериментальный и теоретический анализ особенностей воздействия приливного эффекта на электрическое поле в приземном слое атмосферы потребовали своего развития.

Нами были разработаны модели возникновения приливного эффекта в электрическом и геомагнитном поле пограничного слоя атмосферы [10]. Модели дали оценки величин амплитуд вариаций электрического и геомагнитного полей, вызванных приливными процессами. В случае лунных вариаций геомагнитного поля их величина может составлять 0.18 нТл, для электрического поля величина лунных вариаций оставляет $E_z \simeq (0,3 - 1)$ В/м. Ранее подобные оценки были известны только для ионосферных электромагнитных полей [4]. Адекватность разработанных моделей экспериментальным данным доказана при корреляционно-спектральной обработке результатов мониторинга электрического и геомагнитного поля приземного слоя атмосферы по разнесенным в пространстве станциям [10].

Одно из направлений исследования атмосферных приливов в настоящее время связано с важнейшей ролью приливов в формировании геодинамического режима во всех сейсмоактивных регионах Земли. В анализируемый диапазон частот попадают сейсмогравитационные и собственные колебания Земли. Теория сейсмоэлектродинамики (СЭД) описывает возбуждение электромагнитных сигналов, коррелирующих с землетрясениями. Одной из важнейших фундаментальных проблем геофизики является краткосрочный прогноз землетрясений. Разработки в этом направлении опираются на комплекс методов и средств наблюдений за физико-химическими процессами в различных оболочках Земли.

Обнаружимость сейсмоэлектромагнитных сигналов доказана наблюдениями в Японии, на Камчатке [6, 7]. Вопрос о преобразовании механической энергии очага в энергию электромагнитного поля не вполне ясен.

Источником электромагнитных колебаний в полости Земля-ионосфера могут быть также излучения, проникающие в резонатор через ионосферу из космоса. Космическая природа электромагнитных колебаний, наблюдаемых в приземном слое атмосферы, установлена с высокой степенью достоверности [1]. Речь идет о регулярных и нерегулярных колебаниях геомагнитного поля (колебания P_s и P_i), наблюдаемых в диапазоне частот от нескольких миллигерц до нескольких герц [1].

Измерения в магнитосфере Земли показали, что уровень спектральной плотности колебаний ИНЧ диапазона почти на порядок превышает средний уровень спектральной плотности шумов, наблюдаемых в полости Земля-ионосфера на тех же частотах.

В следующей публикации мы рассмотрим вопросы, связанные с разработанным и запатентованным программно-аналитическим комплексом метода собственных векторов, позволяющим обнаруживать и исследовать периодические процессы, которые носят подшумовой характер (на-

пример, лунные приливы в электромагнитном поле). Будут приведены результаты обработки электрического и геомагнитного полей по разнесенным в пространстве станциям в плане обнаружения воздействия лунных гравитационных приливов и оценки амплитуды полей на частотах приливов.

Проведенные работы потребовали усилий большого коллектива специалистов, аспирантов, студентов. Особая благодарность Шварцу Якову Михайловичу, подготовившему для обработки базы экспериментальных данных Гидрометеорологической службы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блюх П.В. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля-ионосфера / П.В. Блюх, А.П., Николаенко, Ю.Ф. Филиппов // Наукова думка, Киев, 1977. 199 с.
2. Морозов В.Н. Модели глобальной атмосферно-электрической цепи // Гидрометеорология. Сер. Метеорология. Обзорная информация. Обнинск: ВНИГМИ МЦД, 1981, Вып. 8. 57 с.
3. Schonland V.F.J. Atmospheric electricity // Methuen, London, 1932. p.100.
4. Юман М. Молния. / Пер. с англ., под ред. Н.В. Красногорской, М:Мир, 1972. 327 с.
5. Колоколов В.П. К происхождению электрического поля Земли / Труды главной геофизической обсерватории, 1974. Вып. 301. С.10–17.
6. Lyemori T., Kamei T., Tanaka Y., Takeda M., Hashimoto T., Araki T., Okamoto T., Watanabe K., Sumitomo N., Oshiman N. Co-seismic geomagnetic variations observed at the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake / J. Geomag. Geoelectr., 1996. Vol. 48. pp.1059–1070.
7. Белов С.В. Магнитный эффект сильных землетрясений на Камчатке / С.В. Белов, Н.И. Мигунов, Г.А. Соболев // Геомагнетизм и астрономия. 1974. Т. 14. №3. С.380–382.
8. Атлас временных вариаций природных процессов // Порядок и хаос в литосфере и других сферах // Отв. ред. А.В. Николаев, А.Г. Гамбургцев. ОИФЗ РАН, 1994. 176 с.
9. Ньютон И. Математические начала натуральной философии / Пер. с лат. А.Н. Крылова, под ред. Л.С. Полака. М.: Наука, 1989. 687 с.
10. Грунская Л. В. Экспериментальные и теоретические исследования вариаций напряженности электрического поля, обусловленных солнечными и лунными приливами в приземном слое атмосферы / Л.В. Грунская, В.Н. Морозов. Известия вузов. Физика. 2005. №8. С. 33–39.
11. Грунская Л.В. Приемно-регистрирующая аппаратура для исследования взаимосвязи электрического поля приземного слоя атмосферы с геофизическими процессами / Л.В. Грунская, В.А. Ефимов // Проектирование и технология электронных средств. 2006. №1. С. 69–74.
12. Грунская Л.В. Мобильный приемно-регистрирующий комплекс для мониторинга электромагнитного поля приземного слоя атмосферы / Л.В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. 2005. №2. С. 69–74.
13. Грунская Л.В. Система многоканального синхронного мониторинга электромагнитных полей КНЧ диапазона приземного слоя / Л.В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. 2004. Спец. вып. С. 38–45.
14. Грунская Л.В. Оценка параметров электрического поля приземного слоя атмосферы на основе метода корреляционного приема: монография / Л.В. Грунская. Владимир: Владимирский государственный университет. 2010. 123 с. ISBN 978–5–9984–0054–4.
15. Грунская Л.В. Лунные приливы в электрическом поле пограничного слоя атмосферы / Л.В.Грунская, В.Н. Морозов, В.А. Ефимов, А.А. Закиров // Известия вузов. Физика. 2010. Т.53. №1. С. 22–27.
16. Яновский Б.М. Земной магнетизм / I, II том. Издательство Ленинградского университета. 1963. 899 с.

Поступила в редакцию 01.02.2012

Грунская Любовь Валентиновна, д. т. н., профессор, кафедра общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет, 600001, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87.
E-mail: grunsk@vlsu.ru

Ефимов Вячеслав Алексеевич, к. т. н., доцент, кафедра общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет, 600001, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87.
E-mail: vefimov@vlsu.ru

Закиров Александр Александрович, инженер, кафедра общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет, 600001, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87.
E-mail: cheeter33@mail.ru

Золотов Артём Николаевич, к. т. н., доцент, кафедра общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет, 600001, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87.
E-mail: zolotovan@vlsu.ru

Рубай Дмитрий Васильевич, аспирант, кафедра общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет, 600001, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87.
E-mail: GRATISH@yandex.ru

Лещёв Иван Алексеевич, инженер-программист вычислительного центра, УМВД России по Владимирской области, 600001, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87.
E-mail: i.a.leshchew@gmail.com

L. V. Grunskaya, V. A. Efimov, A. A. Zakirov, A. N. Zolotov, D. V. Rubai, I. A. Leschew
Infralow frequency electromagnetic fields monitoring

Keywords: Earth electromagnetic field, infralow frequency scale, electromagnetic fields monitoring, geophysical process

PACS: 52.60.Pw, 91.25.-r

Earth electromagnetic field is high-sensitive carrier for Earth and space processes. Reliable detection and research of processes in infralow frequency scale need monitoring of electromagnetic fields in diversified stations faraway from each other to hundreds and thousands kilometers. The purpose of research conducted and discussed in this article concerns to structure research of signals in Earth atmosphere boundary layer electromagnetic field produced with such geophysical processes as Solar and Lunar tides and seismic processes.

REFERENCES

1. Bliokh P.V. *Global'nye elektromagnitnye rezonansy v polosti Zemlya-ionosfera* (Global electromagnetic resonances in Earth-ionosphere gap), Naukova dumka, Kyev, 1977. 199 pp.
2. Morozov V.N. Modeli global'noi atmosfero-elektricheskoi tsepi (The problems of global atmospheric electric chain). *Gidrometeorologiya. Meteorology series*. Review information. Obninsk: VNIGMI MCD, 1981, issue 8. 57 p.
3. Schonland B.F.J. *Atmospheric electricity* Methuen, London, 1932. p.100.
4. Uman M. *Lightening*. McGraw Hill, 1969.
5. Kolokolov V.P. K proiskhozhdeniyu elektricheskogo polya Zemli (Concerning generation of Earth' electric field). *Trudy glavnoi geofizicheskoi observatorii*, 1974. Vol. 301. pp.10–17.
6. Lyemori T., Kamei T., Tanaka Y., Takeda M., Hashimoto T., Araki T., Okamoto T., Watanabe K., Sumitomo N., Oshiman N. Co-seismic geomagnetic variations observed at the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1996. Vol. 48. pp.1059–1070.
7. Belov S.V. Magnitnyi effekt sil'nykh zemletryaseniy na Kamchatke (Magnetic effect of strong earthquakes in Kamchatka). S.V. Belov, N.I. Migunov, G.A. Sobolev. *Geomagnetizm i astronomiya*. 1974. Vol. 14. №3. pp.380–382.
8. *Atlas vremennykh variatsiy prirodnykh processov* (Atlas of time variations of natural processes). Poryadok i khaos v litosfere i drugikh sferakh. OIFZ RAN, 1994. 176 p.
9. Newton I. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 1934, Univ. of California Press.
10. Grunskaya L.V., Morozov V.N. Eksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya variatsiy napryazhonnosti elektricheskogo polya, obuslovlennykh solnechnymi i lunnyimi prilivami v prizemnom sloe atmosfery (Experimental and theoretical research of electric field variations produced by Solar and Lunar tides in atmosphere boundary layer. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2005. №8. pp. 33–39.
11. Grunskaya L.V., Efimov V.A. *Priemno-registriruyushchaya apparatura dlya issledovaniya vzaimosvyazi elektricheskogo polya prizemnogo sloya atmosfery s geofizicheskimi processami* (Receiving and registering equipment for research of connection of atmosphere boundary layer electric field with geophysical processes). *Proektirovanie i tekhnologii elektronnykh sredstv*. 2006. №1. pp. 69–74.
12. Grunskaya L.V. et al. *Mobil'nyi priemno-registriruyushchii kompleks dlya monitoringa elektromagnitnogo polya prizemnogo sloya atmosfery* (Mobile receiving and registration system for atmosphere boundary layer electromagnetic field monitoring). *Proektirovanie i tekhnologii elektronnykh sredstv*. 2005. №2. pp. 69–74.
13. Grunskaya L.V. et al. *Sistema mnogokanal'nogo sinkhronnogo monitoringa elektromagnitnykh polei KNCh diapazona prizemnogo sloya* (System of multichannel synchronous monitoring of electromagnetic field of infralow frequency scale). *Proektirovanie i tekhnologii elektronnykh sredstv*. 2004. Spec. issue. pp. 38–45.
14. Grunskaya L.V. *Otsenka parametrov elektricheskogo polya prizemnogo sloya atmosfery na osnove metoda korrelyatsionnogo priema*. (Estimation of parameters of electric field in boundary layer of atmosphere based on correlation reception method). Vladimir: Vladimir state university. 2010. 123 pp. ISBN 978-5-9984-0054-4.
15. Grunskaya L.V., V.N. Morozov, V.A. Efimov, A.A. Zakirov Lunnye prilivy v elektricheskom pole pogranichnogo sloya atmosfery (Lunar tides in electric field of atmosphere boundary layer). *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2010. Vol.53. №1. pp. 22–27.
16. Yanovskiy B.M. *Zemnoi magnetizm* (Terrestrial magnetism) I, II vol. Izdatelstvo Leningradskogo universiteta. 1963. 899 pp.

Received 01.02.2012

Grunskaya Lyubov Valentinovna, Doctor of Science, Professor, Department of General and Applied Physics, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia.
 E-mail: grunsk@vlsu.ru

Zolotov Artyom Nikolaevich, Doctor of Philosophy, Docent, Department of General and Applied Physics, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia.
 E-mail: vefimov@vlsu.ru

Rubai Dmitry Vasilievich, Advanced Student, Department of General and Applied Physics, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia.
 E-mail: cheeter33@mail.ru

Leschew Ivan Alexeevich, Department of General and Applied Physics, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia.
 E-mail: zolotov@vlsu.ru

Lukyanov Vadim Evgenievich, Advanced Student, Department of General and Applied Physics, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia.
 E-mail: GRATISH@yandex.ru

УДК 550.371.3, 523.31–423.3, 550.370

*В. В. Исакевич,¹ Л. В. Грунская,² Д. В. Исакевич³***ВЫЯВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНО ЛОКАЛИЗОВАННЫХ КОМПОНЕНТ
НА ЧАСТОТАХ ЛУННЫХ ПРИЛИВОВ
ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ^{4 5}**

С использованием анализатора собственных векторов и компонент сигнала (патент РФ на полезную модель №116242 от 30.09.2011) обнаружены некогерентные сложнопериодические компоненты временных рядов вертикальной составляющей электрического поля E_z в пограничном слое атмосферы Земли, локализованные как на частотах, равных частотам лунных приливов, так и на комбинационных частотах частот лунных и солнечных приливов. Обнаруженные составляющие ненаблюдаемы с использованием квадратурной схемы спектрального анализа; модулированы с частотами, кратными 1 год^{-1} , и имеют действующие значения в интервале 0.6–1.1 В/м. Вероятность ложного выявления компонент, спектрально локализованных на частотах лунных приливов, не превышает $2.5 \cdot 10^{-4}$.

Ключевые слова: лунный прилив, электрическое поле Земли, собственный вектор, собственное значение, когерентность.

PACS: 84.37.+q, 92.60.Pw, 92.60.hh

Одна из задач, поставленных при изучении вариаций электрического поля пограничного слоя атмосферы, связана с исследованием воздействия на него приливных процессов. Выявление периодических компонент с частотами лунных приливов во временных рядах вертикальной составляющей E_z электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли на первом этапе осуществлялось с помощью классической квадратурной схемы спектрального оценивания [1].

В результате многолетних наблюдений было установлено, что увеличение интервала анализа при использовании классической квадратурной схемы спектрального анализа не позволяет выявить воздействие лунных приливов на электромагнитное поле в приземном слое атмосферы. Как было показано в дальнейшем [12], это является следствием некогерентности выявляемых составляющих. В связи с этим дальнейшие исследования воздействия приливных процессов на электромагнитное поле Земли велись с использованием анализатора собственных векторов и компонент сигнала [3], показавшего свою эффективность при выделении из экспериментальных временных рядов энергетически недоминирующих квазипериодических составляющих.

В данной статье исследовались четыре временных ряда (ВР) многолетних наблюдений вертикальной составляющей электрического поля E_z пограничного слоя атмосферы: данные экспериментального полигона кафедры общей и прикладной физики ВлГУ (2003–2009 гг.); данные геофизических обсерваторий Душети (1976–1980 гг.), Воейково (1966–1995 гг.), Верхнее Дуброво (1974–1995 гг.).

Обработка ВР велась с использованием анализатора собственных векторов и компонент сигнала (АСВиКС) [3], конструкция которого представлена на рисунке 1. На вход блока масштабирования 1 поступает анализируемый временной ряд X_t ($1 \leq t \leq N$); в блоке 2 вычисляется ковариационная матрица R временного ряда X_t на заданном интервале анализа длины M отсчётов ВР; в блоке 3 производится вычисление собственных векторов $\vec{\psi}_i$ и собственных значений λ_i ($1 \leq i \leq M$); в блоке 4 осуществляется анализ собственных векторов $\vec{\psi}_i$ и собственных значений λ_i — с целью выявления характерных признаков и оценки параметров искомых физических явлений. Ковариационная матрица R в блоке 2 вычисляется с использованием соотношения

$$R = \frac{YY'}{N - M + 1}, \quad (0.1)$$

¹ E-mail: businesssoftservice@gmail.com

² E-mail: grunsk@vlsu.ru

³ E-mail: voiceofhope@yandex.ru

⁴ Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного Задания 2014/13, 2871 и гранта РФФИ №14-07-97510/14.

⁵ При выполнении расчётов использовалось свободное программное обеспечение GNU Octave, CeCILL Scilab, GNU G95.

в котором Y — так называемая траекторная матрица [4]

$$Y = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \vdots & X_{N-M+1} \\ X_2 & X_3 & \vdots & X_{N-M+2} \\ X_3 & X_4 & \vdots & X_{N-M+3} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_M & X_{M+1} & \vdots & X_N \end{bmatrix}. \quad (0.2)$$

Столбцы траекторной матрицы Y представляют собой отрезки ВР, получаемые путём перемещения по нему с единичным шагом интервала анализа длительностью M отсчётов.

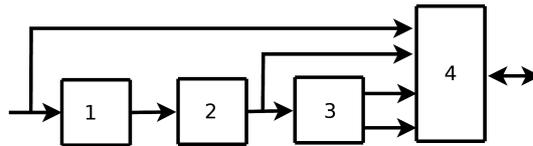


Рис. 1. Анализатор собственных векторов и компонент сигнала [3]. 1 — блок масштабирования. 2 — вычислитель ковариационной матрицы. 3 — вычислитель собственных векторов и собственных значений. 4 — анализатор признаков и компонент временного ряда.

ВР X_t на любом из различных интервалов анализа длительности M может быть представлен в базисе собственных векторов $\vec{\psi}_i$ ковариационной матрицы R (образующих ортонормированный базис [5]), который определяется соотношением

$$R\vec{\psi}_i = \lambda_i\vec{\psi}_i, 1 \leq i \leq M. \quad (0.3)$$

Нетрудно показать, что средняя энергия E ВР, наблюдаемого на интервале анализа, определяется соотношением

$$E = \sum_{i=1}^M r_{i,i} = \text{Tr}R = \sum_{i=1}^M \lambda_i, \quad (0.4)$$

где $r_{i,i}$ — i -ый диагональный элемент ковариационной матрицы R ,

$\text{Tr}R$ — след ковариационной матрицы R .

Собственные векторы, таким образом, представляют собой ортонормированные некоррелированные компоненты анализируемого на интервале M ВР, вносящие в среднюю энергию E анализируемого ВР относительный вклад

$$\lambda_i^{\text{норм.}} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^M \lambda_i}. \quad (0.5)$$

Последовательность собственных значений λ_i , упорядоченную по их убыванию, будем называть спектром собственных значений (ССЗ), а соответствующую ей последовательность (0.5) — нормированным спектром собственных значений (НССЗ).

АСВиКС относится к классу анализаторов с адаптивным базисом; базис, в котором осуществляется представление ВР на конечном интервале анализа, зависит от самого ВР. Нетрудно показать (с использованием известных теорем линейной алгебры [5]), что представление в базисе собственных векторов (СВ) при заданной точности представления ВР на интервале анализа требует наименьшего числа компонент, то есть обладает наибольшей выразительностью. При этом сами СВ несут в себе информацию о структуре исследуемого ВР. Так, при наличии во ВР спектрально локализованных компонент, СВ будут содержать в себе эти компоненты, которые могут быть обнаружены с использованием стандартных средств спектрального анализа. Показано [6], что спектральный анализ СВ обладает большей чувствительностью, чем классический спектральный анализ ВР, особенно в тех случаях, когда компоненты не являются абсолютно когерентными. АСВиКС во многих случаях позволяет выявлять тип анализируемого ВР по форме НССЗ [3].

Использование АСВиКС целесообразно в тех случаях, когда использование классической квадратурной схемы спектрального анализа вызывает затруднения, например, в силу некогерентности

ВР. На рисунках 2, 3 приведены в двойном логарифмическом масштабе оценки амплитуды спектральной составляющей с частотой солнечного прилива S_1 (рисунок 2) и частотой лунного прилива $2N_2$ (рисунок 3), полученные с использованием классической квадратурной схемы для ВР станции Воейково.

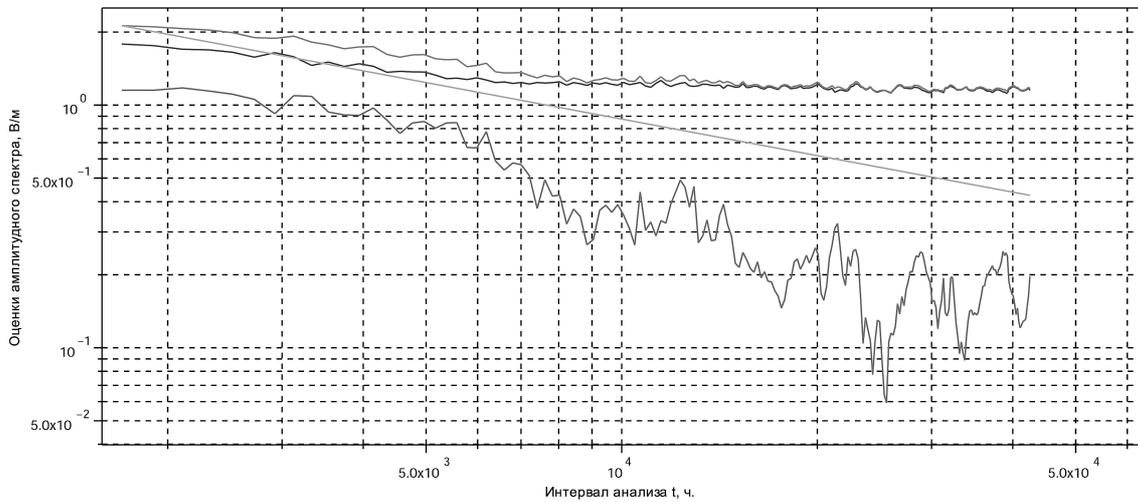


Рис. 2. Зависимость оценки спектральной составляющей на частоте солнечного прилива S_1 от длительности интервала анализа при использовании квадратурной схемы. Верхняя кривая — действующее значение, средняя кривая — выборочное среднее, нижняя кривая — выборочная дисперсия. Прямая $\sim 1/\sqrt{t}$, где t — длина интервала анализа

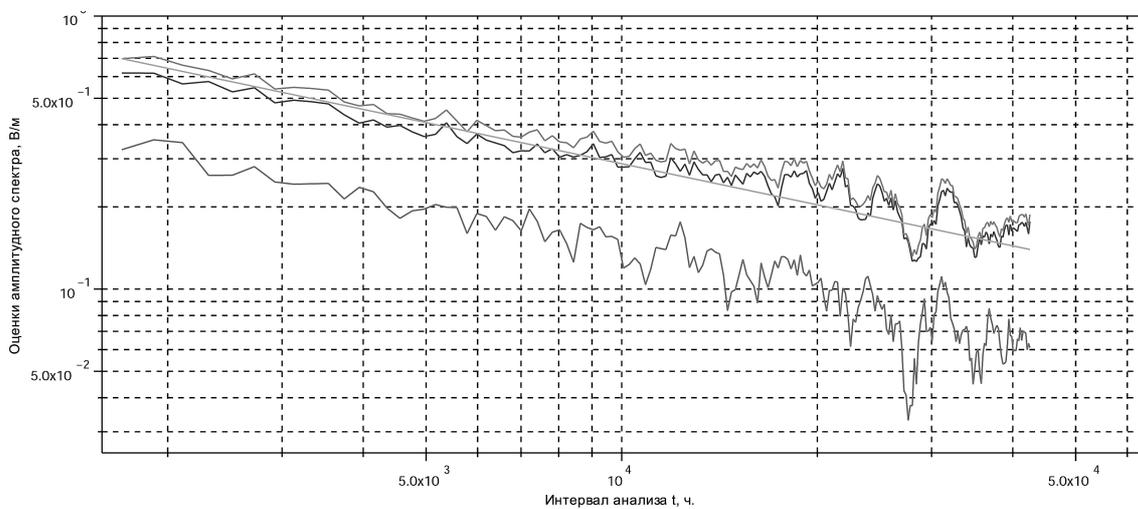


Рис. 3. Зависимость оценки спектральной составляющей на частоте лунного прилива $2N_2$ от длительности интервала анализа при использовании квадратурной схемы. Верхняя кривая — действующее значение, средняя кривая — выборочное среднее, нижняя кривая — выборочная дисперсия. Прямая $\sim 1/\sqrt{t}$, где t — длина интервала анализа

Как видно из рисунка 2, выявление составляющей с частотой солнечного прилива с использованием квадратурной схемы не вызывает затруднений — выборочное среднее и действующее значение сходятся к некоторому ненулевому фиксированному значению, а дисперсия спектральной оценки монотонно падает с увеличением интервала анализа. Для составляющей с частотой лунного прилива (рисунок 3) ситуация иная — по мере роста интервала анализа t выборочное среднее и действующее значение монотонно убывают. Это означает, что когерентная составляющая, локализованная на частоте лунного прилива, отсутствует. Приведённые на рисунках 2 и 3 характерны для всех солнечных и лунных приливов на всех станциях наблюдения.

Для выявления некогерентных составляющих, локализованных на частотах лунных приливов, в блоке 2 АСВиКС использовались ковариационные матрицы размера 1000×1000 , построенные по траекторным матрицам анализируемых ВР. В блоке 4 АСВиКС СВ подвергались спектральному анализу с использованием стандартной процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ).⁶ Для каждого СВ вычислялся индекс когерентности (ИК), равный отношению амплитуды БПФ на частоте прилива к среднему значению амплитуды БПФ (аналог отношения «сигнал–шум»). При использовании БПФ для спектрального анализа ИК ограничен величиной $M/2$ (в данной работе — 500). Выявлялись все СВ, имеющие максимум амплитудного спектра на частоте лунного прилива. Значения ИК для выявленных СВ приведены в последнем столбце таблицы 1.

Таблица 1. Действующие значения некогерентных некоррелированных компонент на частотах лунных приливов, определённые с использованием АСВиКС ($M = 1000$, $\Delta t = 1$ час)

Прилив	Период, ч	Станция	Номер СВ	Действующее значение, В/м	ИК
$2N_2$	14.3261	Воейково	134	0.74	77.89
		Верхнее Дуброво	130	0.63	16.33
		Душети	107	0.65	31.59
		ВлГУ	91	0.66	117
J_1	23.0646	Воейково	89	0.97	107
		Верхнее Дуброво	82	0.89	113
		Душети	119	0.63	57
		ВлГУ	61	1.02	157
M_1	24.8724	Воейково	80	1.03	147
		Верхнее Дуброво	77	0.92	134
		Душети	124	0.62	31
		ВлГУ	47	1.10	264
N_2	12.65	Воейково	167	0.65	67
		Верхнее Дуброво	135	0.62	59
		Душети	131	0.61	58
		ВлГУ	214	0.28	25.5
O_1, Q_1	25.8176, 25.71(6)	Воейково	62	1.13	132
		Верхнее Дуброво	85	0.88	109
		Душети	40	0.79	9
		ВлГУ	49	1.1	190
OO_1	18.9891	Воейково	112	0.83	15
		Верхнее Дуброво	101	0.77	32
		Душети	134	0.61	28
		ВлГУ	179	0.35	52.3

В таблице 1 приведены данные о СВ, имеющих максимумы спектра на частотах лунных приливов. Приведены данные только об одном СВ, имеющем максимальное значение ИК для данных прилива и станции. Для каждого такого СВ рассчитывалось действующее значение главной компоненты, равное произведению действующего значения ВР на $\sqrt{\lambda_i^{\text{норм}}}$. Детально эта методика изложена в работе [12]. Как видно из таблицы 1, действующие значения составляющих E_z , спектрально локализованных на частотах лунных приливов, лежат в интервале 0.6–1.1 В/м и хорошо согласуются для ВР, полученных на различных станциях. В таблице 1 приведены только те лунные приливы, у которых частоты значительно отличаются от частот гравитационно-волнового воздействия двойных звёздных систем, анализу воздействия которых на электромагнитное поле посвящена следующая статья.

На рисунках 4, 5, 6 приведены примеры собственных векторов и их нормированных к максимуму амплитудных спектров для некоторых лунных приливов и станций наблюдения. Как видно из рисунков, нормированные амплитудные спектры локализованы вблизи частот лунных приливов.

⁶Частотное разрешение БПФ при $M = 1000$ отсчётов и времени дискретизации $\Delta t = 1$ час ограничено величиной дискрета частоты $\Delta f = 0.278$ мкГц.

Показано [7], что если на вход АСВиКС воздействует полигармонический ВР, то СВ его ковариационной матрицы могут содержать гармонические составляющие только с теми частотами, которые содержатся в исходном полигармоническом ВР. Несмотря на то, что анализируемые нами ВР E_z не являются полигармоническими, в СВ и их амплитудных спектрах, локализованных на частотах определенных приливов, следует ожидать наличие также и составляющих, локализованных на других частотах (в частности, на частотах других лунных приливов). Посмотрим с этой точки зрения на результаты, представленные на 4, 5, 6.

На рисунке 4 представлены СВ и его амплитудный спектр, имеющий максимум на частоте M_1 . Как отмечено ранее, дискрет частоты $\Delta f = 0.278$ мГц; наблюдаемая ширина амплитудного спектра не менее $4\Delta f$, в неё укладываются частоты приливов O_1 , Q_1 и P_1 , K_1 , расположенные по отношению к частоте прилива M_1 симметрично (см. рисунок 9). Именно это, на наш взгляд, обусловило правильную форму СВ, характерную для биений в случае близких частот, а также правильную форму амплитудного спектра СВ. На рисунке 5 слева от главного максимума амплитудного спектра СВ имеется пик, соответствующий частоте прилива $2N_2$ (с точностью Δt). Таким образом, в отобранные для одного лунного прилива СВ могут вносить вклад не только другие лунные приливы, но и другие физические явления. Следовательно, оценки действующих значений, приведённые в 1 — это оценки сверху.

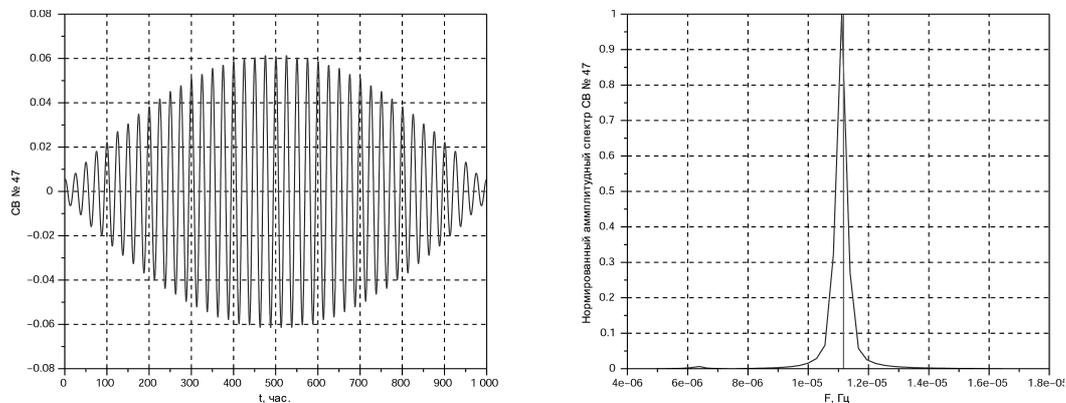


Рис. 4. Собственный вектор, локализованный на частоте лунного прилива M_1 , и его нормированный амплитудный спектр. Полигон ВлГУ. Сплошная вертикальная линия соответствует частоте прилива M_1

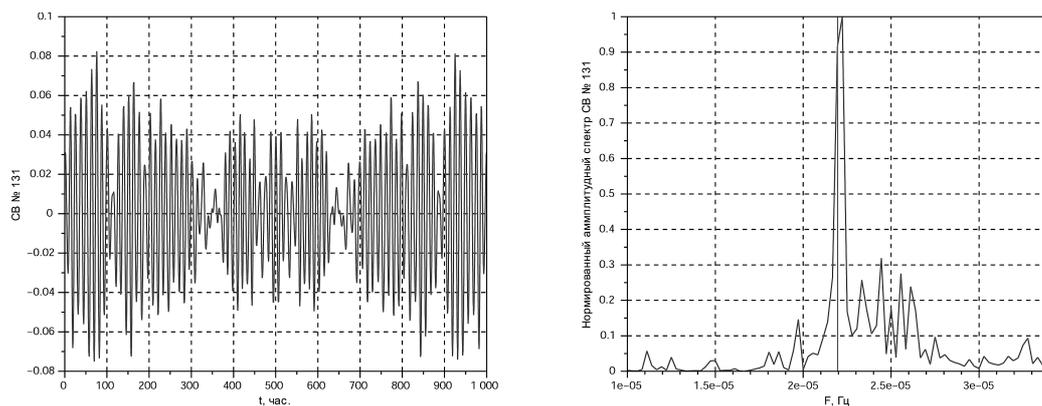


Рис. 5. Собственный вектор, локализованный на частоте лунного прилива N_2 , и его нормированный амплитудный спектр. Душети. Сплошная вертикальная линия соответствует частоте прилива N_2

В [3] показано, что при амплитудных модуляциях одних локализованных по спектру составляющих ВР другими локализованными по спектру составляющими, АСВиКС должен выявлять СВ, АС которых локализован не только на частотах модулируемой и модулирующей составляющих, но и на суммарной и разностной частотах. С использованием АСВиКС такие составляющие были обнаружены; на рисунке 7 приводится пример трёх СВ, которые соответствуют частоте лунного прилива K_2 , а также суммарной и разностной частотам лунного прилива K_2 и солнечного прилива

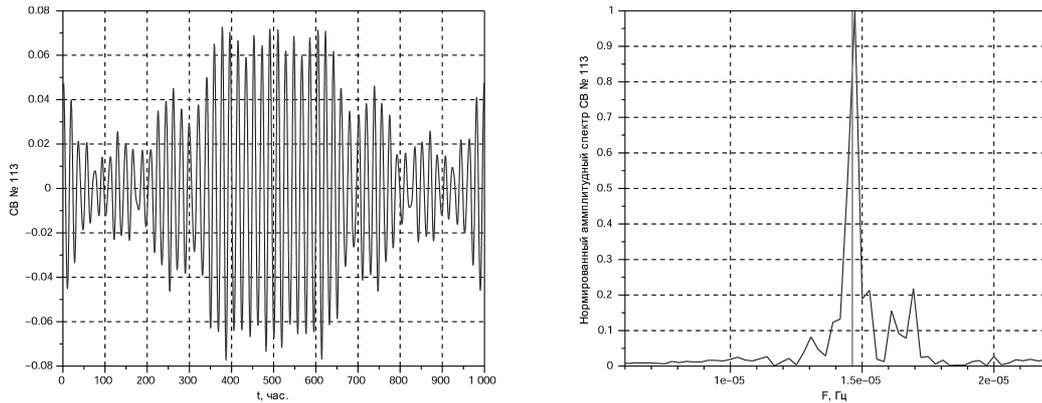


Рис. 6. Собственный вектор, локализованный на частоте лунного прилива OO_1 , и его нормированный амплитудный спектр. Воейково. Сплошная вертикальная линия соответствует частоте прилива OO_1

S_1 . Предложенный подход для выявления взаимных модуляций эффективен, когда модулирующая частота заметно превышает спектральное разрешение БПФ, используемого при спектральном анализе СВ, что соответствует, при заданных параметрах АСВиКС, периоду модулирующей составляющей менее 1000 часов. Таким образом, для выявления годовых модуляций данный подход непригоден.

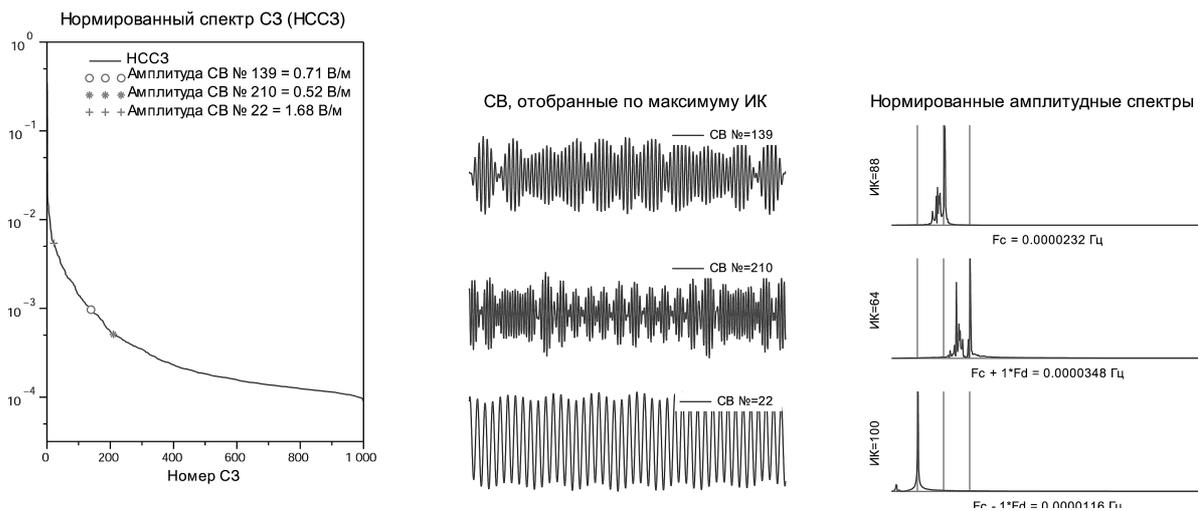


Рис. 7. Выявление СВ, спектрально локализованных на частотах лунного прилива K_2 , суммарной и разностной частотах лунного прилива K_2 и солнечного прилива S_1 по данным станции наблюдения Воейково. Левый график — НССЗ с нанесёнными на него нормированными СВ для выявленных СВ, в легенде графика указываются действующие значения выявляемых компонент. Три средних графика соответствуют выявленным СВ для частот, равных частоте лунного прилива K_2 , суммарной и разностной частоте соответственно. Справа — три графика АС для соответствующих СВ.

Вертикальными линиями на этих графиках показаны выявляемые частоты.

Показано, что амплитуды составляющих, локализованных на частотах лунных приливов, изменяются периодически с частотами, кратными 1 год^{-1} . Для этого нормы проекций ВР на спектрально локализованные на частотах лунных приливов СВ сравнивались с тестовым полигармоническим рядом, составляющие которого имеют единичные амплитуды и частоты, кратные 1 год^{-1} . На рисунке 8 приведен пример амплитудного спектра для нормы проекции ВР наблюдений на станции Душети на СВ, локализованные на частоте лунного прилива O_1 .

Обнаружение АМ подтверждает влияние изменения положения Земли относительно Солнца в течение годового цикла на составляющие ВР E_z , локализованные на частотах лунных приливов. Следует отметить, что такие модуляции характерны для большинства СВ ВР E_z , что свидетельствует о том, что порождающие их физические процессы также подвержены влиянию годовых циклов.

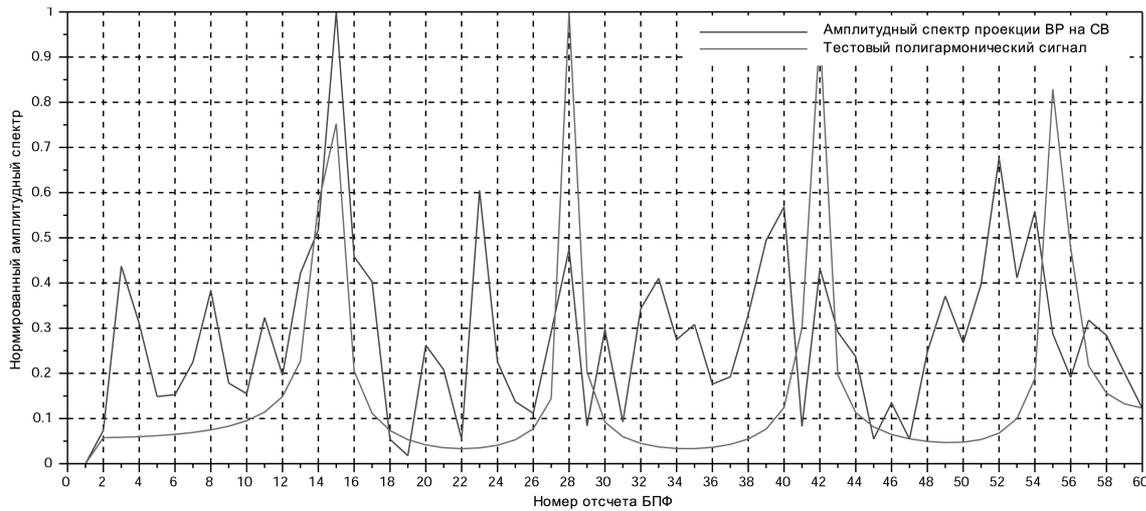


Рис. 8. Амплитудный спектр нормы проекции ВР E_z на станции Душети на подпространство, образованное СВ №40 и №43, спектрально локализованные на частоте лунного прилива O_1 , в сравнении с амплитудным спектром тестового полигармонического ВР с периодами составляющих 1, 1/2, 1/3, 1/4 года

Естественно задаться вопросом: не могут ли собственные векторы, локализованные на частотах лунных приливов, возникать случайно? Таким образом, задача подтверждения или опровержения гипотезы случайности приобретает особое значение. Воспользуемся стандартными подходами [8] для оценки вероятности «ложной тревоги» (вероятности того, что гипотеза случайности верна). Известно, что такая вероятность определяется, с одной стороны, правилом принятия решения, а с другой — статистическими свойствами используемых в этом правиле величин. В качестве решающего правила можно использовать простейшее правило выборочного контроля « k из K ». Сформулируем это правило.

Правило 1 Пусть имеется K значений ИК I_j ($1 \leq j \leq K$), полученных для СВ, отобранных при анализе всех имеющихся ВР E_z для всех исследованных частот лунных приливов. Если $k \geq k_0$ из этих значений превышают соответствующие им пороговые значения h_j , то гипотеза случайности отвергается.

Для правила 1 гипотеза случайности приобретает вид

Гипотеза 1 Наблюдаемые $k \geq k_0$ из K возможных превышений порога h_j индексами когерентности I_j возникли случайно.

Эта гипотеза имеет простую альтернативу

Гипотеза 2 Наблюдаемые $k \geq k_0$ из K возможных превышений порога h_j индексами когерентности I_j обусловлены не случаем.

Примем в качестве h_j квантили, соответствующие вероятности их превышения индексом когерентности I_j , равной p . Тогда вероятность того, что гипотеза 1 верна (вероятность «ложной тревоги») в рамках биномиального распределения оценивается соотношением

$$P_{лт}(k_0, K, h) = P\{k \geq k_0 | \text{Гипотеза 1}\} = \sum_{k=k_0}^K C_K^k p^k (1-p)^{K-k}, \quad (0.6)$$

где p — вероятность превышения величиной ИК порога h_j .

При h_j , равных медиане ИК, что соответствует $p = 1/2$, и $k_0 > pK$ соотношение (0.6) упрощается и приобретает вид неравенства

$$P_{лт}(k_0, K) \leq \frac{C_K^{k_0}}{2^K} (K - k_0 + 1). \quad (0.7)$$

Этому соответствует простое решающее правило

Правило 2 Если наблюдаются не менее k_0 (из K возможных) значений ИК, превышающих медианное значение ИК, то принимается гипотеза, альтернативная гипотезе 1.

Для использования правила 2 и оценки $P_{лт}$ формулой (0.7), необходимо оценить медианные значения ИК на частотах лунных приливов. С этой целью были проведены два вычислительных эксперимента.

В первом из вычислительных экспериментов из всех четырёх исходных ВР строился ансамбль отрезков ВР длины $N = 10^4$ отсчётов (объём ансамбля 50–60). Для каждого такого отрезка строились ковариационные матрицы, вычислялись СВ и их БПФ. Для каждого из вычисленных БПФ определялось положение максимума амплитудного спектра и ИК. Далее для каждого положения максимума амплитудного спектра была построена выборка ИК, а затем по этой выборке оценивалась медиана. Таким образом была построена зависимость медианы ИК от частоты максимума амплитудного спектра СВ, характеризующая все имеющиеся экспериментальные ВР. Эта зависимость приведена на рисунке 9.

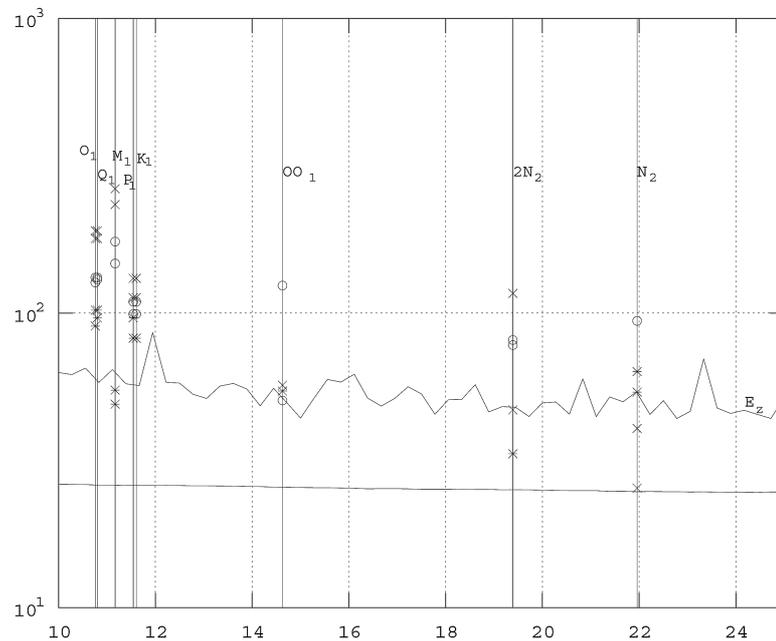


Рис. 9. Зависимость ИК от положения максимума амплитудного спектра СВ, полученная вычислительным экспериментом для отрезков ВР E_z (верхняя кривая) и отрезков БГШ той же длины (нижняя кривая), в сравнении с ИК СВ ВР E_z , спектрально локализованных на частотах лунных приливов: вертикальные линии — частоты лунных приливов; \times — ВлГУ; $*$ — Душети; o — Воейково

Аналогично, во втором вычислительном эксперименте была определена зависимость медианы ИК от частоты максимума амплитудного спектра СВ для ансамбля отрезков ВР белого гауссовского шума (БГШ), имеющих длину $N = 10^4$ отсчётов (объём ансамбля 200). Эта зависимость также приведена на рисунке 9. Как видно из рисунка 9, медианные значения ИК для БГШ существенно меньше медианы ИК для ВР E_z .

Использование соотношения (0.7), данных об ИК СВ, локализованных на частотах лунных приливов, а также оценок медианных значений, полученных в первом вычислительном эксперименте, позволяет получить оценку для $k_0 = 36$, $K = 45$ в виде неравенства $P_{лт}(36, 45) \leq 2.5 \cdot 10^{-4}$.

Второй вычислительный эксперимент не имеет непосредственного отношения к анализируемым ВР. Однако он позволяет ответить на нередко слышимое от критиков утверждение: «Возьмите гауссовский шум, и Ваш АСВиКС даст тот же результат, который Вы наблюдаете при анализе ВР E_z ». Вычислительный эксперимент показывает, что при действии БГШ на АСВиКС наблюдаемое превышение значений ИК может возникнуть с вероятностью $P_{лт}(43, 45) \leq 8.4 \cdot 10^{-11}$.

Таким образом, анализ временных рядов многолетних наблюдений E_z на четырёх станциях (Воейково, Душети, Верхнее Дуброво, Полигон ВлГУ) с использованием анализатора собствен-

ных векторов и компонент сигнала позволяет говорить о выявлении некогерентных сложнопериодических составляющих на частотах лунных приливов с вероятностью «ложной тревоги», не превышающей $2.5 \cdot 10^{-4}$.

Для получения результатов работы были использованы авторские методики и программное обеспечение, предоставленные ООО «БизнесСофтСервис» [13, 14].

Заключение

1. Показано, что компоненты временных рядов (ВР) вертикальной составляющей электрического поля (E_z) в пограничном слое атмосферы Земли, локализованные на частотах лунных приливов, в отличие от солнечных приливов некогерентны. Это приводит к тому, что с увеличением интервала анализа спектральные оценки, полученные с помощью классической квадратурной схемы, уменьшаются; таким образом, с использованием квадратурной схемы составляющие, локализованные на частотах лунных приливов, ненаблюдаемы.
2. Анализатор собственных векторов и компонент сигнала [3] (АСВиКС), в отличие от классической квадратурной схемы спектрального анализа, позволяет выявлять некогерентные составляющие, локализованные на частотах лунных приливов. АСВиКС использует представление ВР в ортонормированном адаптивном базисе собственных векторов $\vec{\psi}_i$ (СВ) ковариационной матрицы ВР. СВ полностью определяются ковариационной матрицей и, следовательно, несут в себе информацию о внутренних связях ВР на выбранном интервале анализа. В данной работе интервал анализа имеет длину $M = 10^3$ отсчетов ВР при времени дискретизации 1 час. Как показали исследования ВР E_z , СВ имеют сложнопериодическую структуру. Спектральный анализ СВ позволяет выявить среди них те, которые локализованы на характерных для ВР частотах.
3. Каждому СВ $\vec{\psi}_i$ соответствует собственное значение λ_i (СЗ), величина которого равна средней на интервале анализа энергии составляющей ВР, соответствующей СВ. СЗ λ_i , отнесенные к их сумме и упорядоченные по убыванию, образуют нормированный спектр СЗ (НССЗ). В этом случае нумерация СВ ведётся по убыванию соответствующих им СЗ. Значения $\lambda_i^{\text{норм}}$. НССЗ определяют относительный энергетический вклад соответствующих СВ $\vec{\psi}_i$ некоррелированных составляющих в исследуемом ВР. Действующее значение составляющей в этом случае определяется как произведение действующего значения ВР на $\sqrt{\lambda_i^{\text{норм}}}$. Показано, что действующие значения составляющих, локализованных на частотах лунных приливов, лежат в интервале 0.6–1.1 В/м.
4. Степень локализации амплитудных спектров СВ вблизи частот лунных приливов оценивалась индексом когерентности (ИК), величина которого равна отношению амплитуды быстрого преобразования Фурье (БПФ) на частоте прилива к среднему значению амплитуды БПФ. ИК можно рассматривать в качестве аналога отношения «сигнал–шум»; его величина ограничена величиной $M/2$ (в данной работе — 500). Для исследованных ВР и частот лунных приливов экспериментальные оценки ИК лежат в интервале 9–264.
5. На основании вычислительного эксперимента с использованием ВР E_z построена зависимость медианы ИК от частоты максимума амплитудного спектра СВ. Для максимумов амплитудных спектров, соответствующих частотам лунных приливов, медиана ИК лежит в интервале 47–60. Аналогично с использованием вычислительного эксперимента определена зависимость медианы ИК от частоты максимума амплитудного спектра СВ для ансамбля отрезков ВР белого гауссовского шума (БГШ). Следует отметить, что медианные значения ИК для БГШ меньше, чем у отрезков наблюдаемых ВР.
6. Сравнение конкретных значений ИК, полученных для ВР E_z и исследованных частот лунных приливов, с медианными значениями ИК, позволяет с использованием биномиального распределения оценить вероятность «ложной тревоги» (вероятность случайного превышения медианы конкретными значениями ИК). Для частот лунных приливов 36 из 43 конкретных значений ИК превышают медиану, чему соответствует вероятность «ложной тревоги» не более $2.5 \cdot 10^{-4}$.
7. Показано, что амплитуды составляющих, локализованных на частотах лунных приливов, как и большинства других некоррелированных составляющих, изменяются периодически с частотами, кратными 1 год^{-1} .

Таким образом, использование АСВиКС с высокой достоверностью подтверждает наличие некогерентных сложнопериодических компонент вертикальной составляющей E_z электрического поля Земли, спектрально локализованных на частотах лунных приливов, позволяет оценить степень их когерентности и их действующие значения.

Использованные сокращения

АСВиКС	анализатор собственных векторов и компонент сигнала
БГШ	белый гауссовский шум
БПФ	быстрое преобразование Фурье
ВР	временной ряд
ИК	индекс когерентности
НССЗ	нормированный спектр собственных значений
СВ	собственный вектор
СЗ	собственное значение
ССЗ	спектр собственных значений

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грунская Л.В., Морозов В.Н., Ефимов В.А., Золотов А.Н., Рубай Д.В., Закиров А.А. Мониторинг электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы Земли, Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing. — ISBN: 978-3-659-32919-7. 2013 г., 192 с.
2. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Рубай Д.В., Золотов А.Н. Исследование воздействия лунных приливов на электромагнитное поле пограничного слоя атмосферы с помощью метода собственных векторов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. №4. С. 65–70.
3. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В. Анализатор собственных векторов и компонент сигнала. Патент РФ на полезную модель №116242 от 30.09.2011. URL: <http://bankpatentov.ru/node/207042>
4. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Под ред. Данилова Д.Л., Жиглявского А.А. Санкт-Петербург. СПбГУ, 1997. URL: <http://www.gistatgroup.com/gus/book1/algor.html>
5. Кострикин А.И. Введение в алгебру. Часть 2. Линейная алгебра. М.: Физматлит, 2000. 368 с.
6. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Батин А.С., Сушкова Л.Т. Использование собственных векторов ковариационных матриц для обнаружения гармонических составляющих временных рядов // Известия института инженерной физики. 2012. Т.17. №3. С. 45–50.
7. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Сушкова Л.Т., Лукьянов В.Е. Частотные свойства ковариационной матрицы и её собственных векторов при анализе полигармонических временных рядов. Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. №11. С. 024–033.
8. Миддлтон Д. Очерки теории связи. М.: Советское радио, 1966. 159 с.
9. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Батин А.С. Программное обеспечение для анализа собственных векторов ковариационных матриц временных рядов. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения №2008614391, 2008.
10. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Батин А.С. Программное обеспечение для распределенной обработки данных в среде Lotus Notes/Domino. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения №2012616590, 2012.

Поступила в редакцию 30.05.2014

Исакевич Валерий Викторович, к. т. н., старший научный сотрудник, кафедра общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет, 600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87; директор по развитию, общество с ограниченной ответственностью «БизнесСофтСервис», 600001, Россия, г. Владимир, ул. Большая Московская, 61.

E-mail: businesssoftservice@gmail.com

Грунская Любовь Валентиновна, д. т. н., профессор, кафедра общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет, 600001, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87.

E-mail: grunsk@vlsu.ru

Исакевич Даниил Валерьевич, инженер-исследователь, кафедра общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет, 600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87; технический директор, общество с ограниченной ответственностью «БизнесСофтСервис», 600001, Россия, г. Владимир, ул. Большая Московская, 61.

E-mail: voiceofhope@yandex.ru

V. V. Isakevich, L. V. Grunskaya, D. V. Isakevich

Detection of Earth electric field components spectrally localized on frequencies of the Lunar tides

Keywords: Lunar tide, electric field of Earth, eigenvector, eigenvalue, coherence.

PACS: 84.37.+q, 92.60.Pw, 92.60.hh

Using the patented eigenvector and signal components analyser the time series of vertical electric field E_z in boundary layer of the Earth's atmosphere are researched. Non-coherent complex periodic components which consist of frequencies located near the Lunar tides frequencies are detected. These components cannot be observed using the classic quadrature scheme of spectral analysis and are modulated with 1 year⁻¹ harmonic frequencies while having active values from 0.6 to 1.1 V/m.

REFERENCES

1. Grunskaya L.V., Morozov V.N., Efimov V.A., Zolotov A.N., Rubai D.V., Zakirov A.A. *Monitoring elektromagnitnykh polei pogranichnogo sloya atmosfery Zemli* (Monitoring of Earth's atmosphere boundary layer electromagnetic fields), Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing. — ISBN: 978-3-659-32919-7. 2013, 192 pp.
2. Grunskaya L.V., Isakevich V.V., Isakevich D.V., Rubai D.V., Zolotov A.N. Research of Lunar tides influence to Earth's atmosphere boundary layer electromagnetic field using eigenvector method, *Izv. Vyssh. Obr. Uchr. Fizika*, 2013, no. 4 (56), pp. 65–70.
3. Grunskaya L.V., Isakevich V.V., Isakevich D.V. Eigenvector and signal component analyzer. Utility model patent RU №116242.
4. Danilov D.L., Zhiglyavsky A.A. *Glavnye komponenty vremennykh ryadov: metod Gusenitza* (Principal components of time series: Caterpillar method), Russia, Saint-Petersburg University, 1997. <http://www.gistatgroup.com/gus/book1/algor.html>
5. Kostrikin A.I. *Vvedenie v algebr. Chast' 2. Lineinaya algebra* (Introduction into algebra. Part 2. Linear algebra), Moscow, Fizmatlit, 2000. 368 pp.
6. Isakevich V.V., Isakevich D.V., Grunskaya L.V., Batin A.S., Sushkova L.T. Using covariance matrix eigenvector for time series harmonic components detection, *Izv. Inst. Inzh. Fiz.*, 2012, no. 3 (17), pp. 45–50.
7. Isakevich V.V., Isakevich D.V., Grunskaya L.V., Sushkova L.T., Lukianov V.E. Frequency properties of covariance matrix and it's eigenvectors in polyharmonic time series analysis, *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2013, no. 11 (18), pp. 24–33.
8. Middleton D. *Topics in communication theory*, New York: McGraw-Hill, 1960. Translated under the title *Ocherki po teorii svyazi*, Moscow: Sovetskoe radio, 1962, 159 p.
9. Isakevich V.V., Isakevich D.V., Batin A.S. Program for time series covariance matrix eigenvector analysis. Federal registration certificate №2008614391, 2008.
10. Isakevich V.V., Isakevich D.V., Batin A.S. Program for distributed data processing on Lotus Notes/Domino platform. Federal registration certificate №2012616590, 2012.

Received 30.05.2014

Isakevich Valery Victorovich, Doctor of Philosophy, Senior Researcher, Department of General and Applied Physics, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia; Chief Development Officer, BusinessSoftService Ltd, ul. B. Moskovskaya, 61, Vladimir, 600001, Russia.

E-mail: businesssoftservice@gmail.com

Grunskaya Lyubov Valentinovna, Doctor of Science, Professor, Department of General and Applied Physics, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia.

E-mail: grunsk@vlsu.ru

Isakevich Daniel Valerievich, Engineering Researcher, Department of General and Applied Physics, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia; Chief Technical Officer, BusinessSoftService Ltd, ul. B. Moskovskaya, 61, Vladimir, 600001, Russia.

E-mail: voiceofhope@yandex.ru

УДК 550.371.3, 550.379

*Л. В. Грунская,¹ В. В. Исакевич,² Д. В. Исакевич,³ Л. Т. Сушкова⁴***ВЫЯВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНО ЛОКАЛИЗОВАННЫХ КОМПОНЕНТ
НА ЧАСТОТАХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ^{5 6}**

С использованием анализатора собственных векторов и компонент сигнала (патент РФ на полезную модель №116242) обнаружены некогерентные сложнопериодические компоненты временных рядов вертикальной составляющей электрического поля E_z в пограничном слое атмосферы Земли, локализованные на частотах гравитационно-волнового (ГВ) воздействия двойных звёздных систем (ДЗС) и частоте аксион-фотонного взаимодействия (АФВ). Обнаруженные компоненты ненаблюдаемы с использованием квадратурной схемы спектрального анализа и имеют действующие значения в интервале 0.05–0.5 В/м на частотах ГВ-воздействия ДЗС и 0.7–2.7 В/м для частоты аксион-фотонного взаимодействия. Вероятность того, что спектральная локализация собственных векторов на частотах ГВ-воздействия ДЗС является следствием случайных обстоятельств для рассмотренных временных рядов E_z не превышает $1.2 \cdot 10^{-4}$ – $9.8 \cdot 10^{-3}$; при оценке по всем временным рядам на частотах ГВ-воздействия ДЗС — не превышает 10^{-9} . Вероятность того, что спектральная локализация собственных векторов на частоте аксион-фотонного взаимодействия случайна — не превышает 0.06. Для всех рассмотренных временных рядов (ВР) E_z выявлены спектрально локализованные на суммарной и разностной частотах ГВ-воздействия ДЗС и АФВ компоненты с действующими значениями от 0.05 до 0.59 В/м, свидетельствующие о наличии амплитудной модуляции компонент, спектрально локализованных на частотах ГВ-воздействия ДЗС, частотой АФВ. Вероятность ложного выявления эффекта таких модуляций для разных ВР лежит в пределах $1.9 \cdot 10^{-6}$ – $4.3 \cdot 10^{-3}$ при общей вероятности ложного обнаружения этого эффекта менее $1.2 \cdot 10^{-15}$. Показано, что частота АФВ амплитудно модулирует компоненты, спектрально локализованные на частотах лунных и солнечных приливов.

Ключевые слова: гравитационно-волновое воздействие двойных звёздных систем, аксион-фотонное взаимодействие, электрическое поле Земли, собственный вектор, собственное значение, когерентность.

PACS: 92.60.Pw, 04.80.Nn, 14.80.Va

Введение

Исследования электромагнитного поля пограничного слоя атмосферы Земли [1] в частотном диапазоне лунно-солнечных приливов привели к выявлению некогерентных компонент в электрическом и геомагнитном поле, спектр которых локализован на частотах гравитационно-волнового воздействия релятивистских двойных звёздных систем. Достоверное выявление таких компонент подтверждено анализом временных рядов многолетних наблюдений электрического поля Земли на разнесённых по территории России станциях.

Накопление экспериментальных материалов велось в течение большого периода времени (1997–2012 гг.), за который был создан разнесённый в пространстве детектирующий комплекс для мониторинга электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы Земли в инфранизкочастотном диапазоне (ИНЧ) [2]; в этот же период времени велось совершенствование методики обработки временных рядов, которая привела к созданию инновационного решения «Анализатор собственных векторов и компонент сигнала» (АСВиКС) [3].

В теоретическом и экспериментальном плане постановка проблемы о косвенном обнаружении периодических компонент, локализованных на частотах гравитационно-волновых воздействий источников астрофизического происхождения, по индуцированным ими электромагнитным полям в резонаторе Земля–ионосфера является весьма актуальной. Основа теории взаимодействия квазистатических электромагнитных полей с гравитационными излучениями была заложена в работах

¹E-mail: grunsk@vlsu.ru

²E-mail: businesssoftservice@gmail.com

³E-mail: voiceofhope@yandex.ru

⁴E-mail: ludm@vlsu.ru

⁵Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного Задания 2014/13, 2871 и гранта РФФИ №14-07-97510/14.

⁶При выполнении расчётов использовалось свободное программное обеспечение GNU Octave, CeCILL Scilab, GNU G95.

Bocchetti D., Гинзбурга В.Л., Зельдовича Я.Б. [4–6]. Было показано, что при наличии магнитного поля периодическое гравитационное излучение приводит к формированию переменного электромагнитного поля, изменяющегося с частотой гравитационного излучения. Эти пионерские работы стимулировали всплеск интереса как в нашей стране, так и за рубежом. Оказалось, что с теоретической точки зрения этот эффект должен приводить к образованию аддитивной добавки в электромагнитный потенциал, которая существенно зависит от свойств среды, в которой заключено исходное магнитное поле; в вакууме этот эффект чрезвычайно слаб, однако, в ряде случаев возможно аномальное усиление отклика [7–9]. Идея рассматривать Землю как детектор ГВ-излучений возникла сравнительно давно: в обзоре Милюкова В.К. и Руденко В.Н. [10] приведены данные о том, что еще в 1960-е гг. в работах Дж. Вебера и Т. Дэйсона изучалась возможность сейсмографического детектирования ГВ-излучений. И если задача непосредственного сейсмографического детектирования механических колебаний Земли, вызванных ГВ-излучениями, на фоне геопомех всё ещё выглядит утопической, то изучение электромагнитных полей Земли в инфранизкочастотном (ИНЧ) диапазоне, как будет показано в данной работе, позволяет обнаружить ГВ-излучение с высокой достоверностью.

Как было теоретически предсказано, в процессе мониторинга ИНЧ-вариаций электрического и геомагнитного поля Земли могут быть найдены следы аксион-фотонных взаимодействий [11]. По гипотезе авторов программы исследования аксион-фотонных взаимодействий [11] на базе мониторинга ИНЧ-вариаций электромагнитного поля Земли, реликтовые аксионы, входящие в состав скоплений тёмной материи в окрестности Земли, имеют неоднородное распределение. По данным теоретических исследований, в электрическом поле пограничного слоя атмосферы Земли аксион-фотонные взаимодействия должны проявляться на частоте, близкой к $5 \cdot 10^{-6}$ Гц [11].

Данная работа посвящена выявлению компонент вертикальной составляющей электрического поля Земли в пограничном слое атмосферы, спектрально локализованных на частотах гравитационно-волновых воздействий источников астрофизического происхождения (двойных звёздных систем — ДЗС) и на частоте аксион-фотонного взаимодействия.

Как и в предыдущей работе, для обработки временных рядов (ВР) использовался анализатор собственных векторов и компонент сигнала (АСВиКС [3]) с параметрами: интервал анализа $M = 1000$ отсчётов, время дискретизации — $\Delta t = 1$ час; исследовались четыре ВР многолетних наблюдений вертикальной составляющей электрического поля E_z пограничного слоя атмосферы Земли: данные экспериментального полигона кафедры общей и прикладной физики ВлГУ (2003–2009 гг.); данные геофизических обсерваторий Душети (1976–1980 гг.), Воейково (1966–1995 гг.), Верхнее Дуброво (1974–1995 гг.). При выявлении спектрально локализованных составляющих использовался спектральный анализ собственных векторов (СВ); отбор осуществлялся по индексу когерентности (ИК), величина которого равна отношению амплитуды быстрого преобразования Фурье (БПФ) на выявляемой частоте к среднему значению амплитуды БПФ. ИК является аналогом отношения «сигнал-шум».

Основная часть

При анализе использовались источники, данные о которых приведены в таблице 1. Для обработки были выбраны те источники, частота которых значимо отличается от частот лунных приливов и не превышает половины частоты дискретизации. В первом столбце таблицы приведено наименование выявляемого источника, а во втором — соответствующая этому источнику частота. В пятом столбце указано округлённое до целого отношение разности частоты выявляемого источника и ближайшей к ней частоты других источников к разрешающей способности по частоте⁷. Наименование ближайшей частоты и её значение приведены в третьем и четвёртом столбцах, соответственно. Значения, приведённые в пятом столбце таблицы 1, показывают запас АСВиКС по разрешающей способности при спектральном анализе собственных векторов при $M = 1000$. Таким образом, при выявлении составляющих на частотах из таблицы 1 имеется достаточная для уверенного разделения этих частот величина спектрального разрешения.

Как и в предыдущей работе [1], составляющие на обнаруживаемых частотах, ненаблюдаемы с использованием стандартной квадратурной схемы спектрального анализа временного ряда — что является следствием их некогерентности на интервале анализа. На рисунке 1 в качестве примера приведены зависимости оценки амплитуды спектральной составляющей на некоторых из выявляемых частот от длительности интервала анализа при использовании квадратурной схемы для трёх частот из таблицы 1. Графики подтверждают отсутствие когерентной составляющей на указанных

⁷ Как и в предыдущей работе [1], величина $\Delta f = 0.278$ мкГц.

Таблица 1. Выявляемые источники и их частоты

Выявляемый источник		Ближайший по частоте источник		$\frac{ f_{\text{выявл.}} - f_{\text{ближ.}} }{\Delta f}$
Наименование	$f_{\text{выявл.}}, 10^{-5}$ Гц	Наименование	$f_{\text{ближ.}}, 10^{-5}$ Гц	
Аксион-фотонное взаимодействие	0.5	Прилив O_1	1.075921027515	20
J1012+5307	3.828211138105	Прилив S_3	3.472222	12
J1537+1155	5.501805538757	J1959+2048	6.06253904577	20
J1959+2048	6.06253904577	J1537+1155	5.501805538757	20
J2130+1210	6.904082103431	J1915+1606	7.16666560145	9
J1915+1606	7.16666560145	J2130+1210	6.904082103431	9

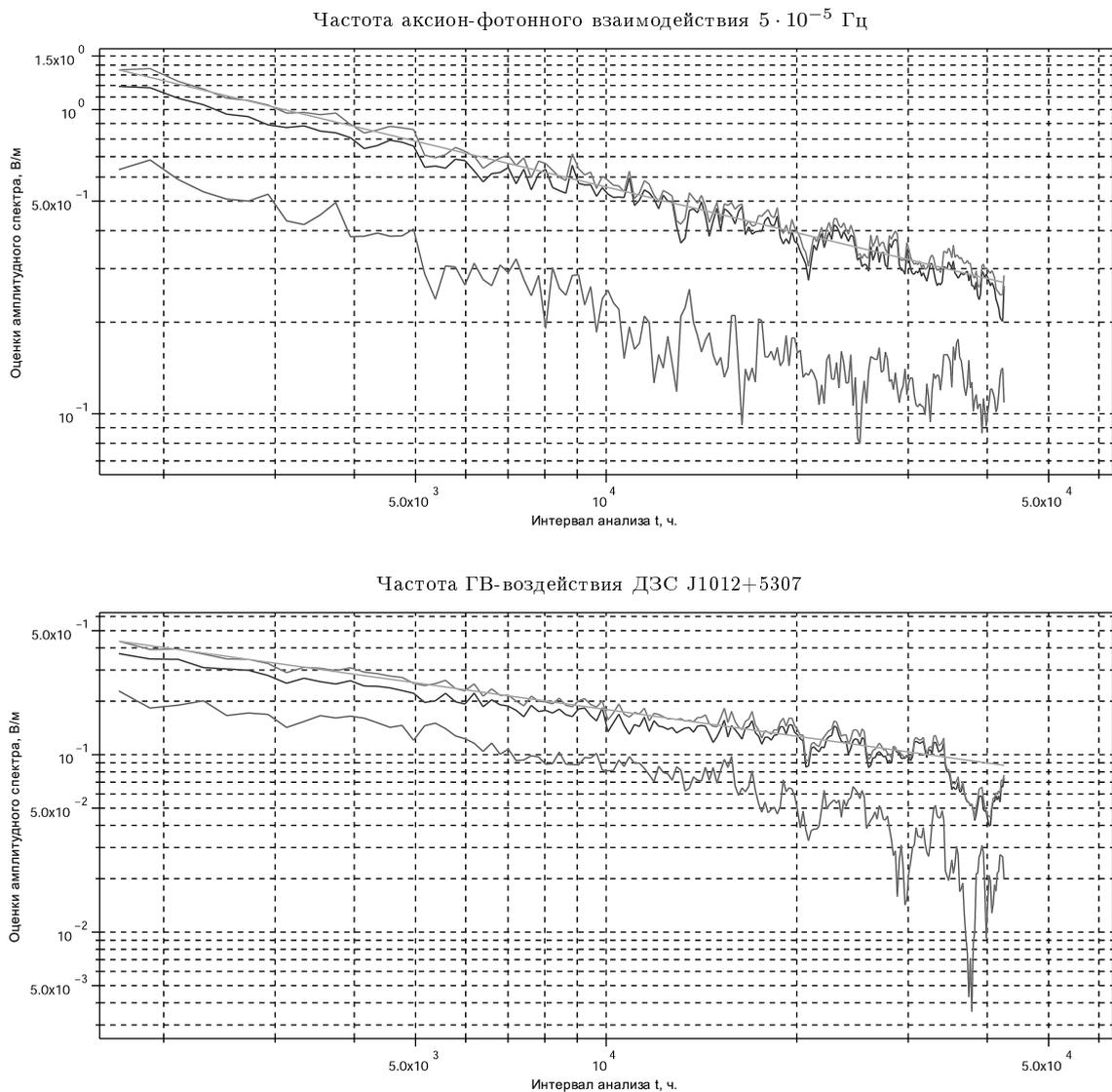


Рис. 1. Зависимость оценки амплитуды спектральной составляющей временного ряда наблюдений на станции Воейково на выявляемых частотах от длительности интервала анализа при использовании квадратурной схемы. Верхняя кривая — действующее значение, средняя кривая — выборочное среднее, нижняя кривая — выборочная дисперсия. Прямая $\sim 1/\sqrt{t}$, где t — длина интервала анализа

частотах. Такие зависимости характерны для всех частот из таблицы 1 и всех четырёх временных рядов.

На рисунках 2–6 представлены некоторые СВ и их амплитудные спектры, определённые с использованием БПФ, локализованные на выявляемых частотах.

В таблицах 2 и 3 приведена сводная информация о поведении собственных векторов (СВ), имеющих максимумы спектра на частотах из таблицы 1, а также данные об ИК и о действующих значениях, определённых по методике, приведённой в предыдущей работе и подробно описанной в [12].

В таблице 2 (предпоследний столбец) приведены сведения о числе превышений индексом когерентности отобранных СВ величины медианы ИК (четвёртый столбец таблицы), полученном для выявляемой частоты в ходе вычислительного эксперимента №1, описанного в предыдущей статье [1]. Число превышений позволяет оценить сверху вероятность «ложной тревоги» $P_{лт}$ выявления периодических компонент с частотами из таблицы 1 для каждой из станций в отдельности (эта вероятность указана для каждой станции в соответствующем подзаголовке таблицы 2), а также по совокупности наблюдений на всех станциях (указана в нижней части таблицы).

Таблица 2. Индексы когерентности и действующие значения собственных векторов, спектрально локализованных на частотах ГВ-воздействия ДЗС, по результатам анализа временных рядов наблюдений E_z

Источник	№№ СВ	ИК СВ	Медиана ИК	Число превышений медианы	Действующее значение амплитуды, В/м
Полигон ВлГУ, $P_{лт}(9, 10) = 9.8 \cdot 10^{-3}$					
J1012+5307	780; 779	45.2; 53.1	34.7	2 из 2	0.092; 0.092
J1537+1155	829; 828	64.2; 61.7	30.4	2 из 2	0.077; 0.077
J1959+2048	799; 798	58.1; 61.9	24.0	2 из 2	0.088; 0.088
J2130+1210	898; 897	68.2; 61.9	27.3	2 из 2	0.055; 0.055
J1915+1606	523; 521	36.3; 26.0	28.8	1 из 2	0.16; 0.16
Воейково, $P_{лт}(13, 13) = 1.2 \cdot 10^{-4}$					
J1012+5307	273	70.5	34.7	1 из 1	0.44
J1537+1155	382; 435; 436	64.6; 58.0; 71.6	30.4	3 из 3	0.36; 0.33; 0.33
J1959+2048	399; 400; 427	72.1; 76.9; 34.0	24.0	3 из 3	0.34; 0.34; 0.33
J2130+1210	568; 491	38.6; 28.3	27.3	2 из 2	0.29; 0.30
J1915+1606	514; 513; 512; 478	36.8; 84.1; 44.5; 38.0	28.8	4 из 4	0.30; 0.30; 0.30; 0.31
Душети, $P_{лт}(11, 12) = 2.9 \cdot 10^{-3}$					
J1012+5307	239; 238	98.5; 98.3	34.7	2 из 2	0.51; 0.51
J1537+1155	376; 375	37.8; 41.4	30.4	2 из 2	0.44; 0.44
J1959+2048	845; 825; 824	31.1; 57.3; 40.5	24.0	3 из 3	0.35; 0.36; 0.36
J2130+1210	340; 339	58.3; 55.6	27.3	2 из 2	0.45; 0.46
J1915+1606	440; 437; 434	20.0; 29.0; 29.4	28.8	2 из 3	0.43; 0.43; 0.43
Верхнее Дуброво, $P_{лт}(8, 9) = 3.1 \cdot 10^{-2}$					
J1012+5307	257	100.0	34.7	1 из 1	0.41
J1537+1155	404; 403	171.0; 165.0	30.4	2 из 2	0.31; 0.31
J1959+2048	500; 499	95.2; 74.2	24.0	2 из 2	0.27; 0.27
J2130+1210	467; 466	55.1; 47.8	27.3	2 из 2	0.28; 0.28
J1915+1606	547; 544	26.2; 31.2	28.8	1 из 2	0.26; 0.26
По всем четырём ВР $P_{лт}(41, 44) = 7.5 \cdot 10^{-10}$					

Оценка вероятности ложной тревоги $P_{лт}$ вычислялась по методике, описанной в статье [1]. $P_{лт}$ меняется от $P_{лт}(13, 13) = 1.2 \cdot 10^{-4}$ (Воейково) до $P_{лт}(8, 9) = 3.1 \cdot 10^{-2}$ (Верхнее Дуброво). Для всей совокупности наблюдений для частот гравитационно-волнового воздействия двойных звёздных систем $P_{лт}(41, 44) = 7.5 \cdot 10^{-10}$. Аналогичные данные для частоты аксион-фотонного взаимодействия приведены в таблице 3. Оценка вероятности ложного выявления наличия спектрально локализованных компонент на этой частоте по всей совокупности проведенных наблюдений не превышает

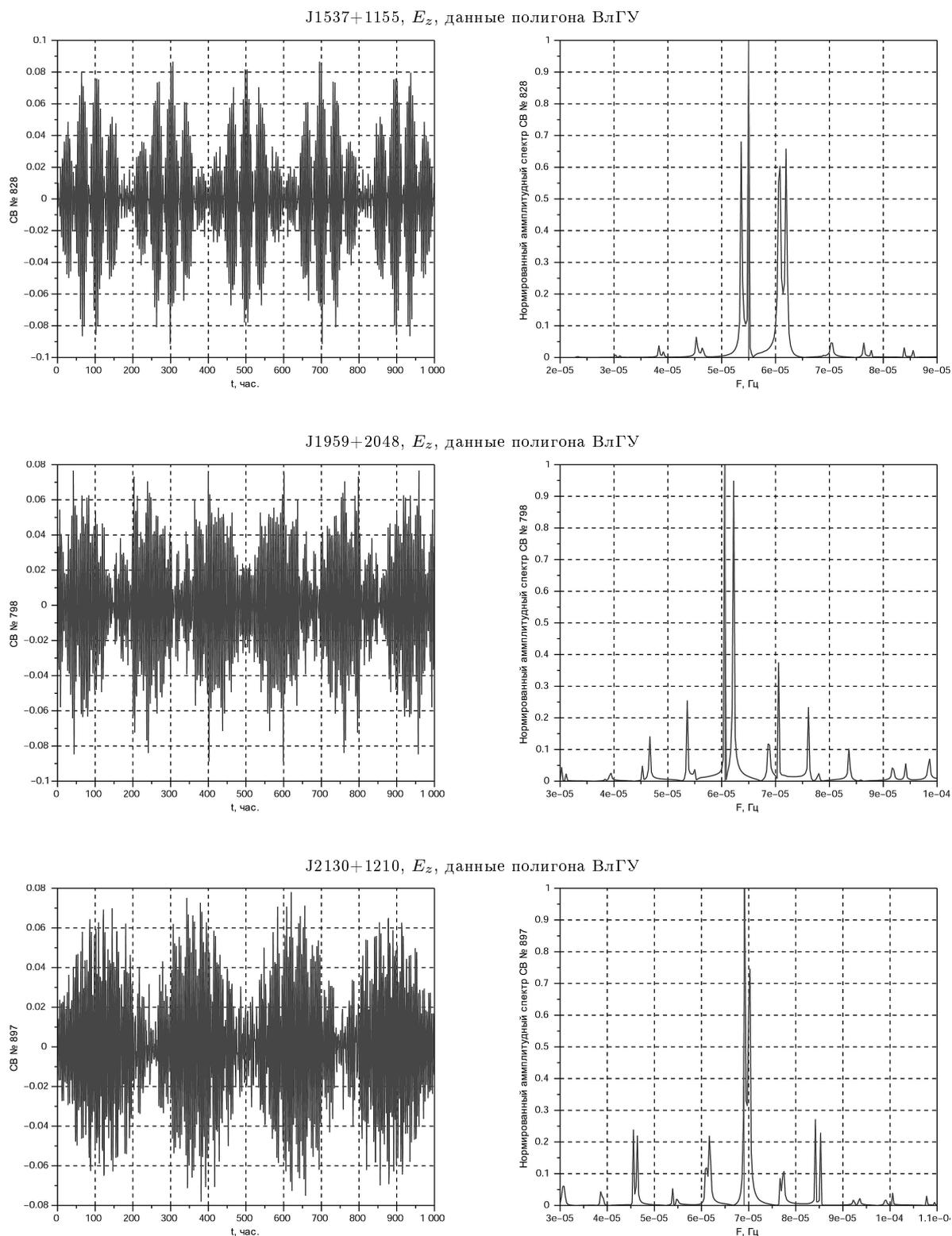


Рис. 2. Собственные векторы (слева), локализованные на частотах ГВ-воздействия ДЗС, и их нормированные амплитудные спектры (справа). Сплошная вертикальная линия на графиках спектров соответствует выявляемой частоте

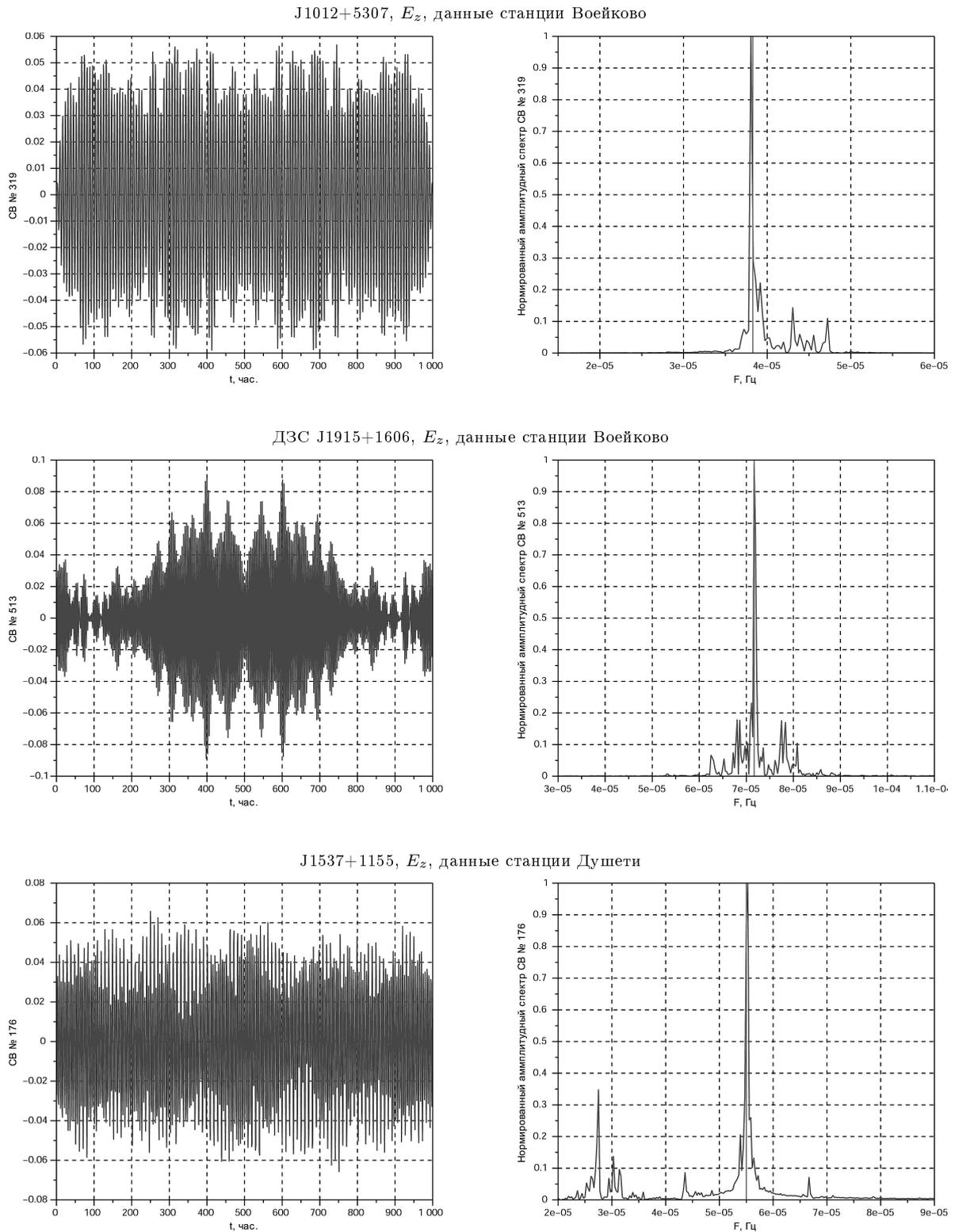


Рис. 3. Собственные векторы (слева), локализованные на частотах ГВ-воздействия ДЗС, и их нормированные амплитудные спектры (справа). Сплошная вертикальная линия на графиках спектров соответствует выявляемой частоте

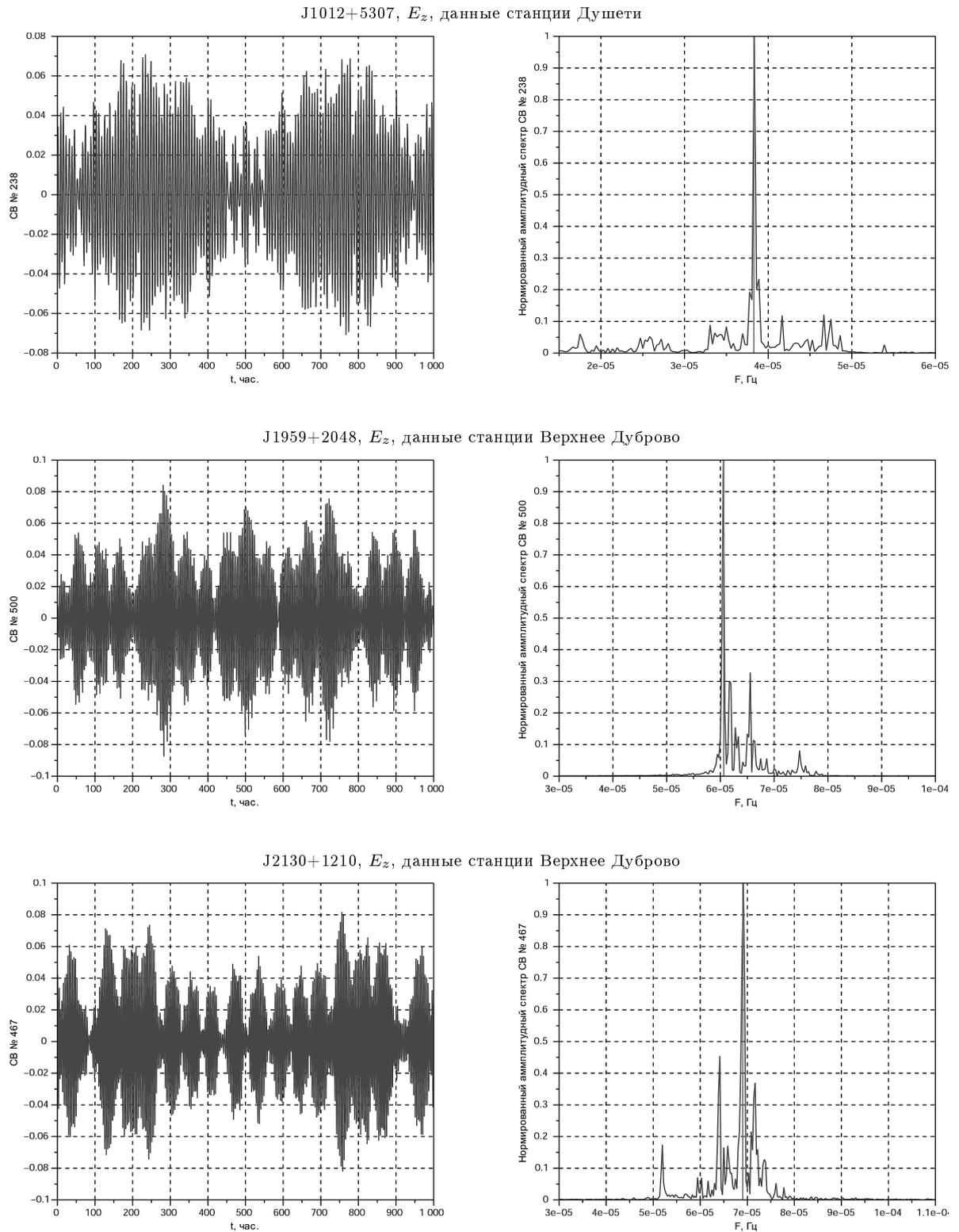


Рис. 4. Собственные векторы (слева), локализованные на частотах ГВ-воздействия ДЗС, и их нормированные амплитудные спектры (справа). Сплошная вертикальная линия на графиках спектров соответствует выявляемой частоте

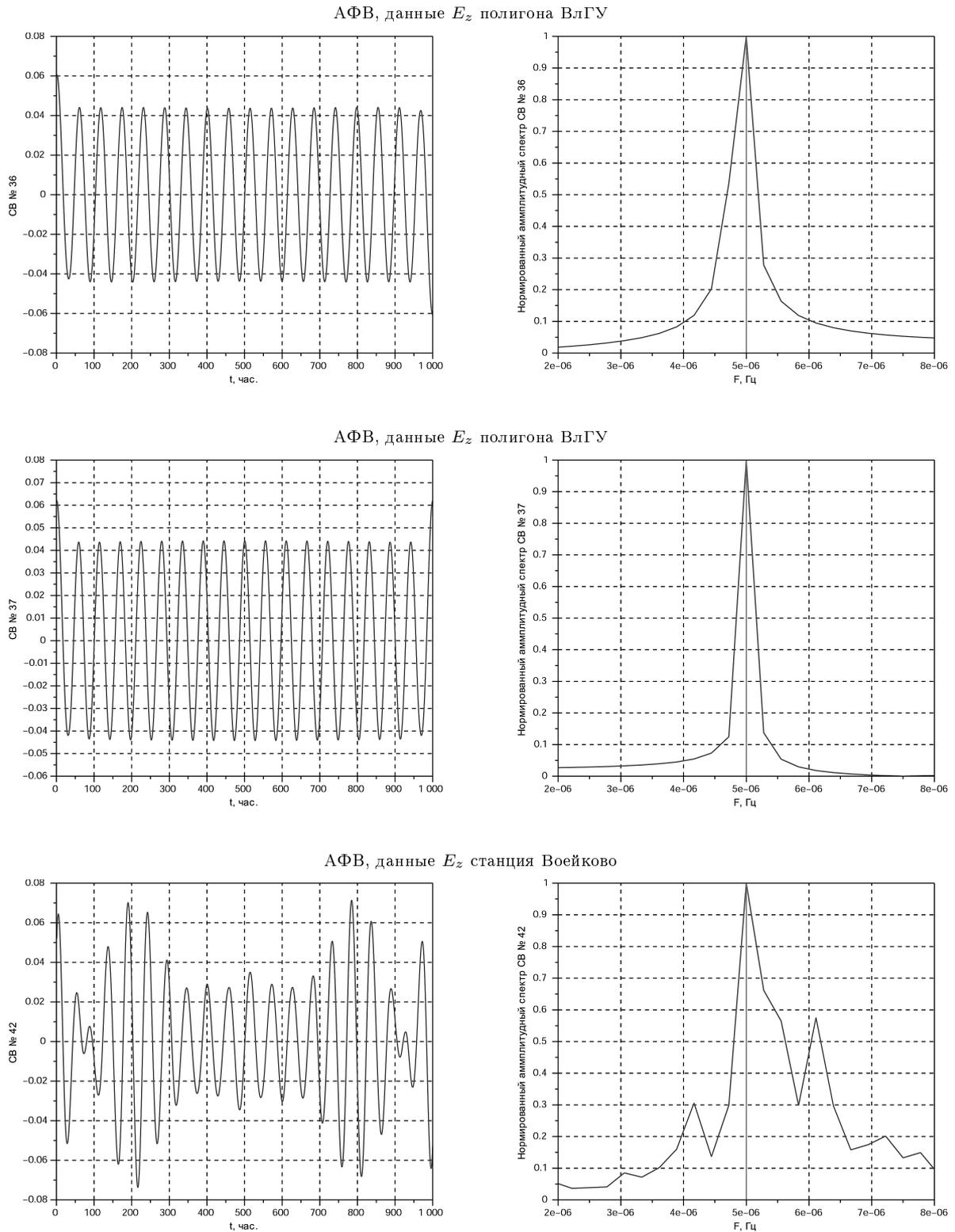


Рис. 5. Собственные векторы (слева), локализованные на частоте аксион-фотонного взаимодействия (АФВ), и их нормированные амплитудные спектры (справа). Сплошная вертикальная линия на графиках спектров соответствует выявляемой частоте

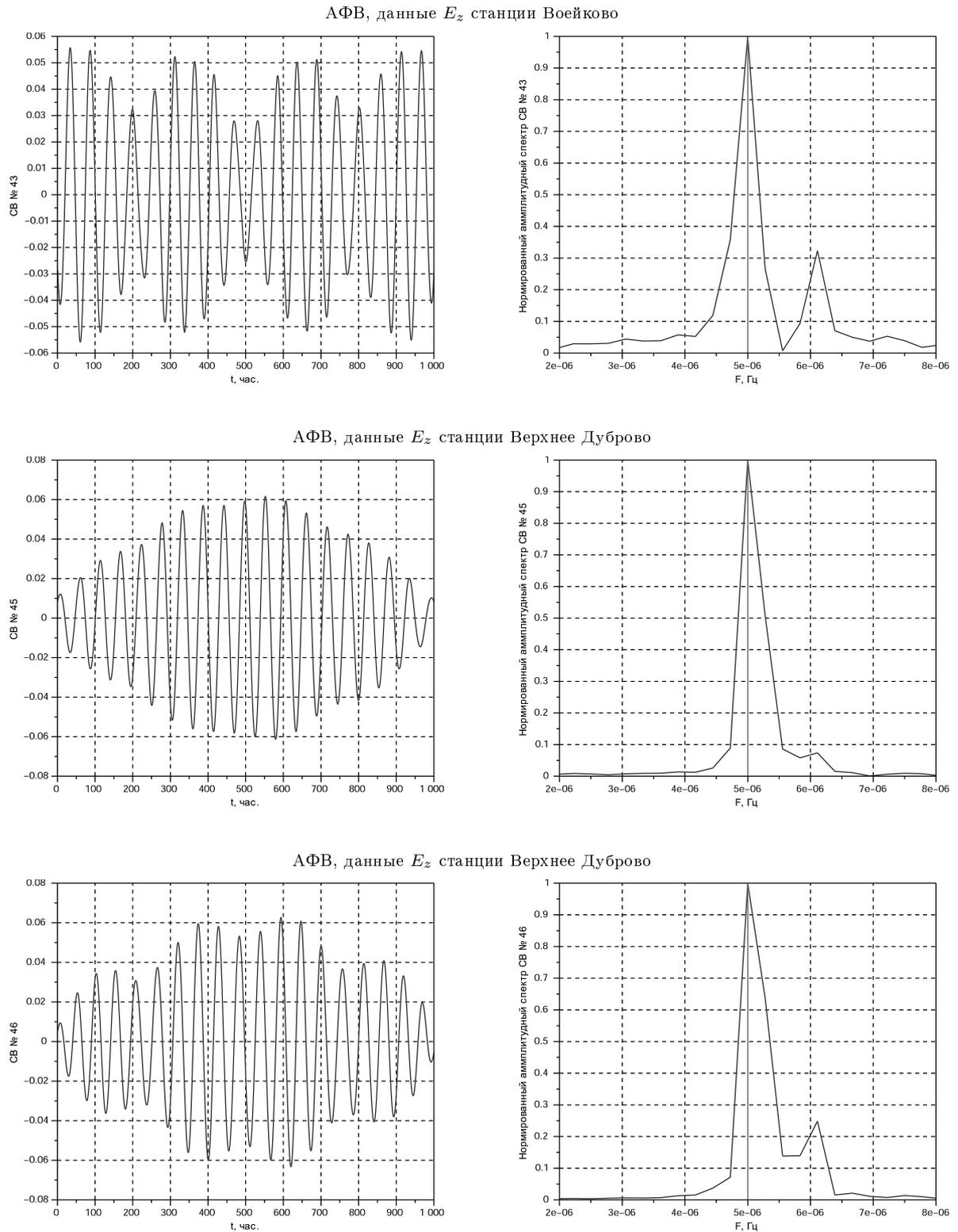


Рис. 6. Собственные векторы (слева), локализованные на частоте аксион-фотонного взаимодействия (АФВ), и их нормированные амплитудные спектры (справа). Сплошная вертикальная линия на графиках спектров соответствует выявляемой частоте

Таблица 3. Индексы когерентности и действующие значения собственных векторов, спектрально локализованных на частоте аксион-фотонного взаимодействия, по результатам анализа временных рядов наблюдений E_z

Станция	№№ СВ	ИК СВ	Действующее значение амплитуды, В/м	Медиана ИК	Число превышений медианы	$P_{лт}$
Полигон ВлГУ	36; 37	73.6; 248.5	2.7; 2.6	63.8	6 из 7	$5.5 \cdot 10^{-2}$
Душети	63	133.3	0.71			
Верхнее Дуброво	45; 46	238; 185.2	1.3; 1.3			
Воейково	42; 43	50.2; 151.8	1.3; 1.3			

Таблица 4. Выявляемые суммарные (с знаком «+») и разностные (с знаком «-») частоты ГВ-воздействия ДЗС и частоты АФВ

Выявляемый комбинационный источник		Ближайший по частоте источник		$\frac{ f_{\text{выявл.}} - f_{\text{ближ.}} }{\Delta f}$
Наименование	$f_{\text{выявл.}}, 10^{-5}$ Гц	Наименование	$f_{\text{ближ.}}, 10^{-5}$ Гц	
J1012+5307+	4.328211138105	S_4	4.629629	11
J1012+5307-	3.328211138105	S_3	3.472222	6
J1537+1155+	6.001805538757	J1959+2048	6.06253904577	3
J1537+1155-	5.001805538757	S_4	4.629629	14
J1959+2048+	6.56253904577	J2130+1210-	6.404082103431	6
J1959+2048-	5.56253904577	J1537+1150	5.501805538757	3
J2130+1210+	7.404082103431	J1915+1606	7.16666560145	9
J2130+1210-	6.404082103431	J1915+1606-	6.66666560145	10
J1915+1606+	7.66666560145	J2130+1210+	7.404082103431	10
J1915+1606-	6.66666560145	J2130+1210	6.904082103431	9

$5.5 \cdot 10^{-2}$. Эта оценка может быть улучшена только за счёт вовлечения в анализ новых временных рядов многолетних наблюдений E_z . Рисунок 7 графически иллюстрирует результаты сравнения индексов когерентности, полученных при отборе собственных векторов, с медианными значениями, полученными в ходе вычислительного эксперимента в соответствии с методикой [1] для диапазона частот, соответствующего АФВ и ГВ-воздействию ДЗС.

В описании патента [3] показано, что если в состав исследуемого ВР входит гармоническая (спектрально локализованная) компонента, которая амплитудно модулирована другим гармоническим ВР (другой спектрально локализованной компонентой), то среди СВ должны появляться СВ, амплитудный спектр которых локализован на суммарной и разностной частотах модулируемого и модулирующего ВР (или суммарной и разностной частотах их спектральной локализации).

Сказанное побудило произвести поиск СВ, амплитудные спектры которых локализованы на суммарной и разностной частотах ГВ-воздействия и частоты АФВ. В таблицу 4, аналогично таблице 1, сведены суммарные и разностные частоты, подлежащие выявлению для подтверждения эффекта амплитудной модуляции с частотой АФВ компонент ВР E_z с частотами ГВ-воздействия ДЗС. Наименования суммарных частот в первом столбце таблицы имеют после наименования ДЗС знак «+», разностных — знак «-». Как и в таблице 1, произведено сравнение подлежащих выявлению частот с близлежащими — с целью определения возможности их разделения в СВ с использованием БПФ при заданных параметрах АСВиКС. Как видно из последнего столбца таблицы 4, запас разрешающей способности по частоте достаточен для раздельного выявления суммарных и разностных частот.

Для суммарных и разностных частот из таблицы 4 был проведён детальный анализ СВ, результаты которого отражены в таблице 5, аналогичной таблицам 2, 3. На рисунках 8, 9 приведены некоторые СВ и их спектры, данные о которых приведены в таблице 5.

На основе значений ИК, полученных для отобранных СВ, и числа превышений этими индексами их медианных значений рассчитывались значения вероятностей ложной тревоги, которые находятся для отдельных проанализированных ВР в пределах от $1.9 \cdot 10^{-6}$ (ВР станции Верхнее Дуброво) до $4.9 \cdot 10^{-3}$ (ВР станции Душети).

Таблица 5. Индексы когерентности и действующие значения собственных векторов, спектрально локализованных на суммарной и разностной частотах ГВ-воздействия ДЗС и частоты АФВ, по результатам анализа временных рядов наблюдений E_z

Наименование комбинационной частоты	№№ СВ	ИК СВ	Медиана ИК	Число превышений медианы	Действующее значение амплитуды, В/м
Полигон ВлГУ, $P_{лт}(17, 19) = 9.8 \cdot 10^{-4}$					
J1012+5307+	256; 257	71.9; 72.6	34.7	2 из 2	0.28; 0.28
J1012+5307-	173; 180	55.0; 44.5	34.7	2 из 2	0.42; 0.40
J1537+1155+	620; 636	19.7; 24.3	30.4	0 из 2	0.13; 0.13
J1537+1155-	201; 202	211; 181	30.4	2 из 2	0.35; 0.35
J1959+2048+	266; 267	194; 205	24.0	2 из 2	0.27; 0.27
J1959+2048-	576; 577	54.4; 55.6	24.0	2 из 2	0.15; 0.15
J2130+1210+	421; 422	40.9; 49.9	27.3	2 из 2	0.19; 0.19
J2130+1210-	307; 308	44.4; 44.2	27.3	2 из 2	0.23; 0.23
J1915+1606+	918; 919	143; 158	28.8	2 из 2	0.05; 0.05
J1915+1606-	300	82.6	28.8	1 из 1	0.24
Воейково, $P_{лт}(18, 18) = 3.8 \cdot 10^{-6}$					
J1012+5307+	340; 341	59.6; 146	34.7	2 из 2	0.38; 0.38
J1012+5307-	237	64.1	34.7	1 из 1	0.4
J1537+1155+	438; 437	48.4; 39.8	30.4	2 из 2	0.33; 0.33
J1537+1155-	327; 328	71.8; 83.1	30.4	2 из 2	0.39; 0.39
J1959+2048+	434	37.4	24.0	1 из 1	0.33
J1959+2048-	382; 430	64.6; 48.5	24.0	2 из 2	0.36; 0.36
J2130+1210+	519; 520	118; 146	27.3	2 из 2	0.30; 0.30
J2130+1210-	474; 475	54.6; 88.1	27.3	2 из 2	0.31; 0.31
J1915+1606+	472; 473	90.7; 94.3	28.8	2 из 2	0.31; 0.31
J1915+1606-	462; 463	64.9; 98	28.8	2 из 2	0.32; 0.32
Душети, $P_{лт}(17, 20) = 4.3 \cdot 10^{-3}$					
J1012+5307+	324; 325	31.6; 56.4	34.7	2 из 2	0.46; 0.46
J1012+5307-	157; 158	121; 65.4	34.7	2 из 2	0.59; 0.59
J1537+1155+	684; 685	79.2; 77.9	30.4	2 из 2	0.38; 0.38
J1537+1155-	408; 409	54.1; 49.7	30.4	2 из 2	0.43; 0.43
J1959+2048+	279; 280	49.0; 59.6	24.0	2 из 2	0.49; 0.49
J1959+2048-	479; 480	39.6; 64.5	24.0	2 из 2	0.42; 0.42
J2130+1210+	424; 425	23.4; 22.2	27.3	0 из 2	0.43; 0.43
J2130+1210-	466; 467	24.9; 32.2	27.3	1 из 2	0.42; 0.42
J1915+1606+	528; 529	29.2; 35.5	28.8	2 из 2	0.41; 0.41
J1915+1606-	199; 201	49.8; 92.9	28.8	2 из 2	0.54; 0.54
Верхнее Дуброво, $P_{лт}(19, 19) = 1.9 \cdot 10^{-6}$					
J1012+5307+	343; 344	42.2; 51.1	34.7	2 из 2	0.34; 0.34
J1012+5307-	261; 262	138; 152	34.7	2 из 2	0.41; 0.41
J1537+1155+	433	42.2	30.4	1 из 1	0.3
J1537+1155-	418; 419	65.3; 112	30.4	2 из 2	0.3; 0.3
J1959+2048+	500; 501	58.9; 66.9	24.0	2 из 2	0.27; 0.27
J1959+2048-	378; 383	42.7; 47.6	24.0	2 из 2	0.33; 0.32
J2130+1210+	459; 460	84.1; 98.7	27.3	2 из 2	0.29; 0.29
J2130+1210-	455; 468	61.9; 42.3	27.3	2 из 2	0.29; 0.28
J1915+1606+	530; 531	102; 47.5	28.8	2 из 2	0.27; 0.26
J1915+1606-	490; 491	127; 116	28.8	2 из 2	0.27; 0.27
По всем четырём ВР $P_{лт}(71, 76) = 1.2 \cdot 10^{-15}$					

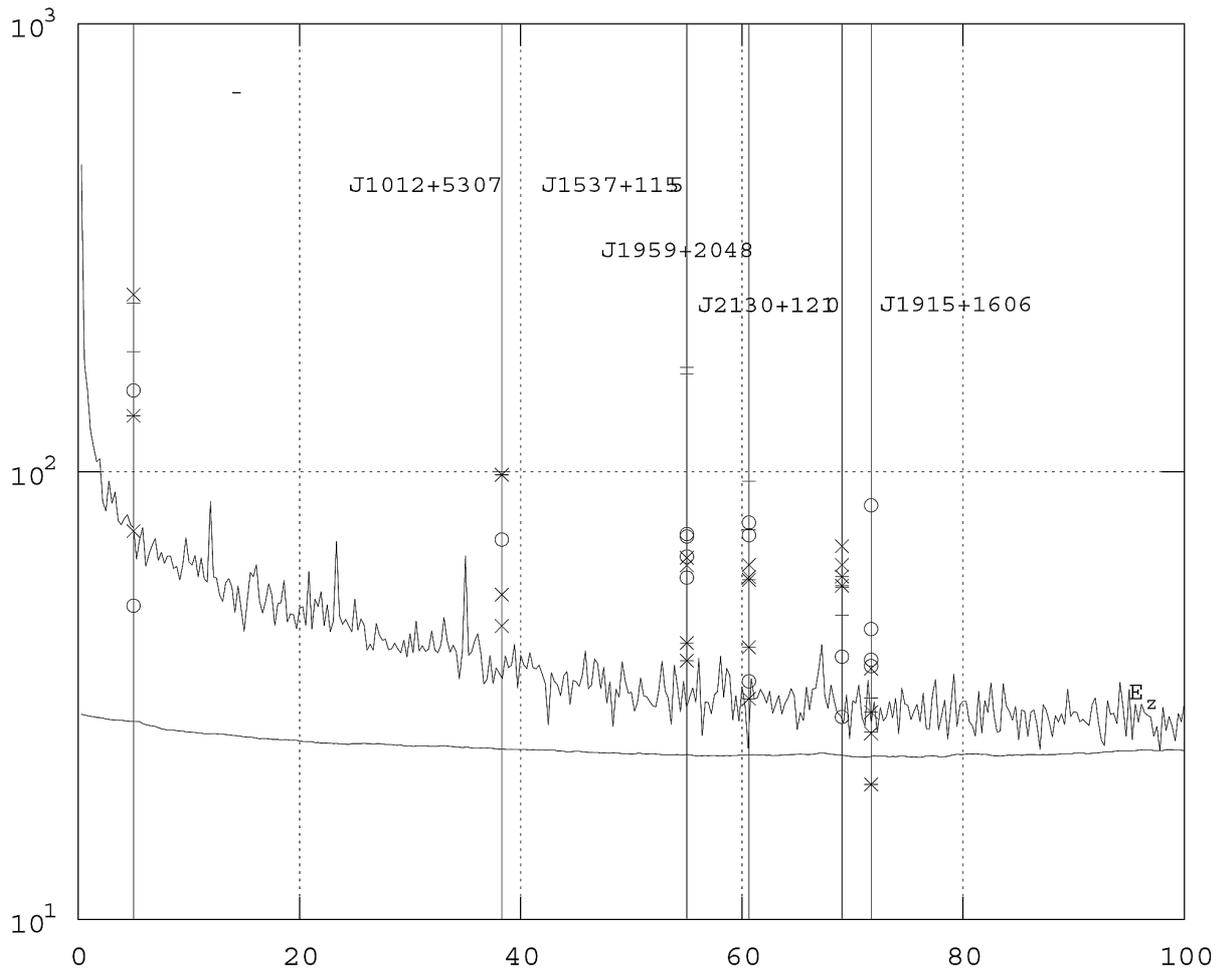


Рис. 7. Зависимость ИК от положения максимума амплитудного спектра СВ, полученная вычислительным экспериментом для отрезков ВР E_z (верхняя кривая) и отрезков БГШ той же длины (нижняя кривая), в сравнении с ИК СВ ВР E_z , спектрально локализованных на частотах ГВ-воздействия ДЗС и аксион-фотонного взаимодействия: вертикальные линии — выявляемые частоты; × — ВлГУ; * — Душети; о — Воейково; + — Верхнее Дуброво. При построении графика использована методика, описанная в [1]. Приведены ИК в диапазоне частот, соответствующем АФВ и ГВ-воздействию ДЗС.

Вероятность ложного выявления факта модуляций частотой АФВ составляющих, локализованных на частотах ГВ-воздействия ДЗС, по всем четырем проанализированным ВР E_z ничтожно мала и не превышает $1.5 \cdot 10^{-15}$. Таким образом, факт модуляций следует считать установленным.

Обнаружение эффекта модуляций частотой АФВ составляющих с частотами ГВ-воздействия ДЗС ставит вопрос о том, насколько широко распространены среди квазипериодических процессов, наблюдаемых в вертикальной составляющей электрического поля пограничного слоя атмосферы, амплитудные модуляции с частотой АФВ. Для предварительного обоснования гипотезы о широкой распространённости таких модуляций на рисунке 10 показаны некоторые СВ, локализованные на суммарной и разностной частотах для одного лунного и одного солнечного прилива. Как видно из рисунка, имеет место спектральная локализация на суммарной и разностной частотах и, следовательно, гипотеза имеет право на существование. Однако, подтверждение этой гипотезы является предметом отдельной работы.

Для получения результатов работы были использованы авторские методики и программное обеспечение [13,14], предоставленное ООО «БизнесСофтСервис», а также экспериментальные базы данных по станциям Гидрометеослужбы, подготовленные Шварцем Я.М.

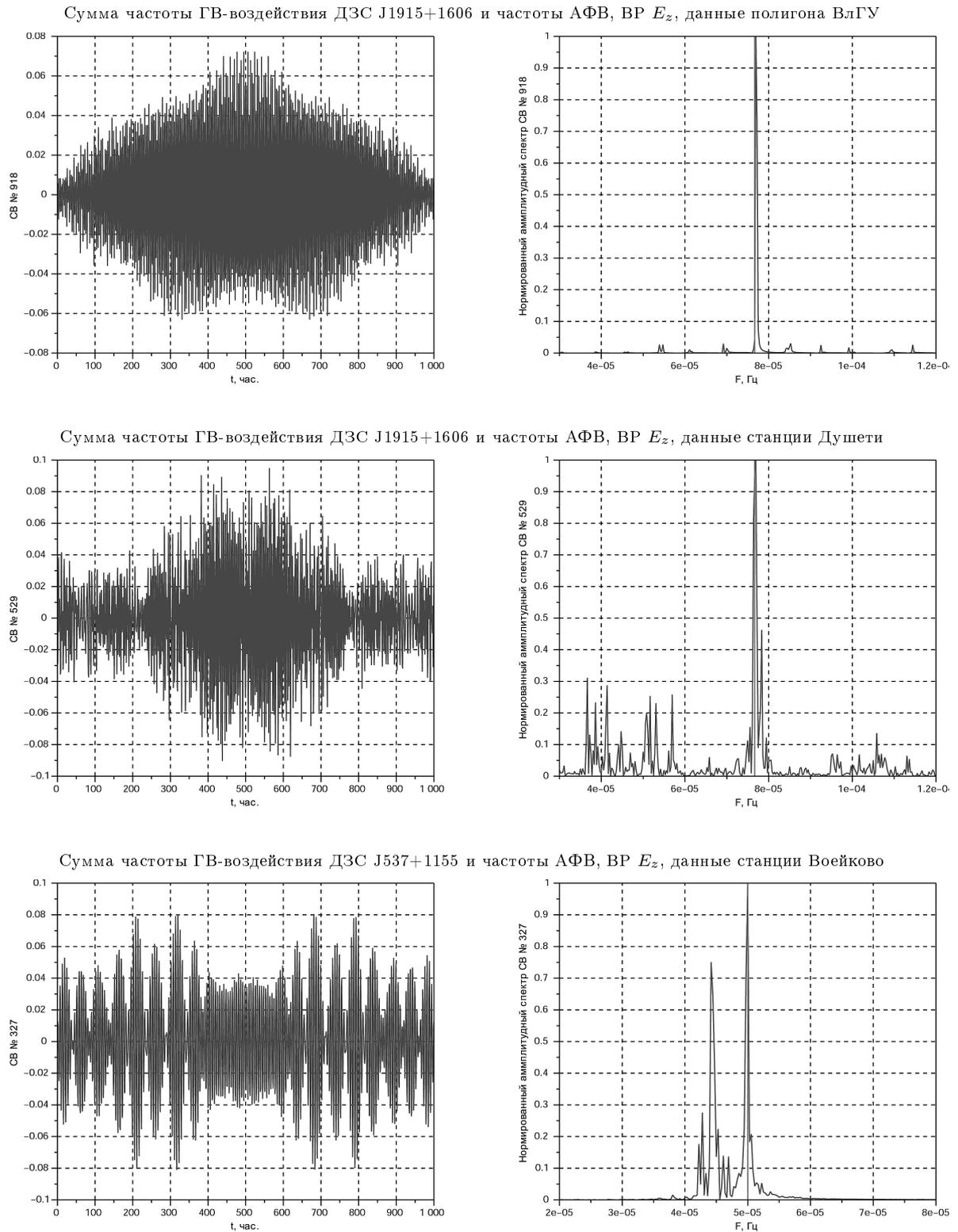


Рис. 8. Собственные векторы (слева), локализованные на комбинационных частотах ГВ-воздействия ДЭС и АФВ, и их амплитудные спектры (справа). Сплошная вертикальная линия на графиках спектров соответствует выявляемой частоте

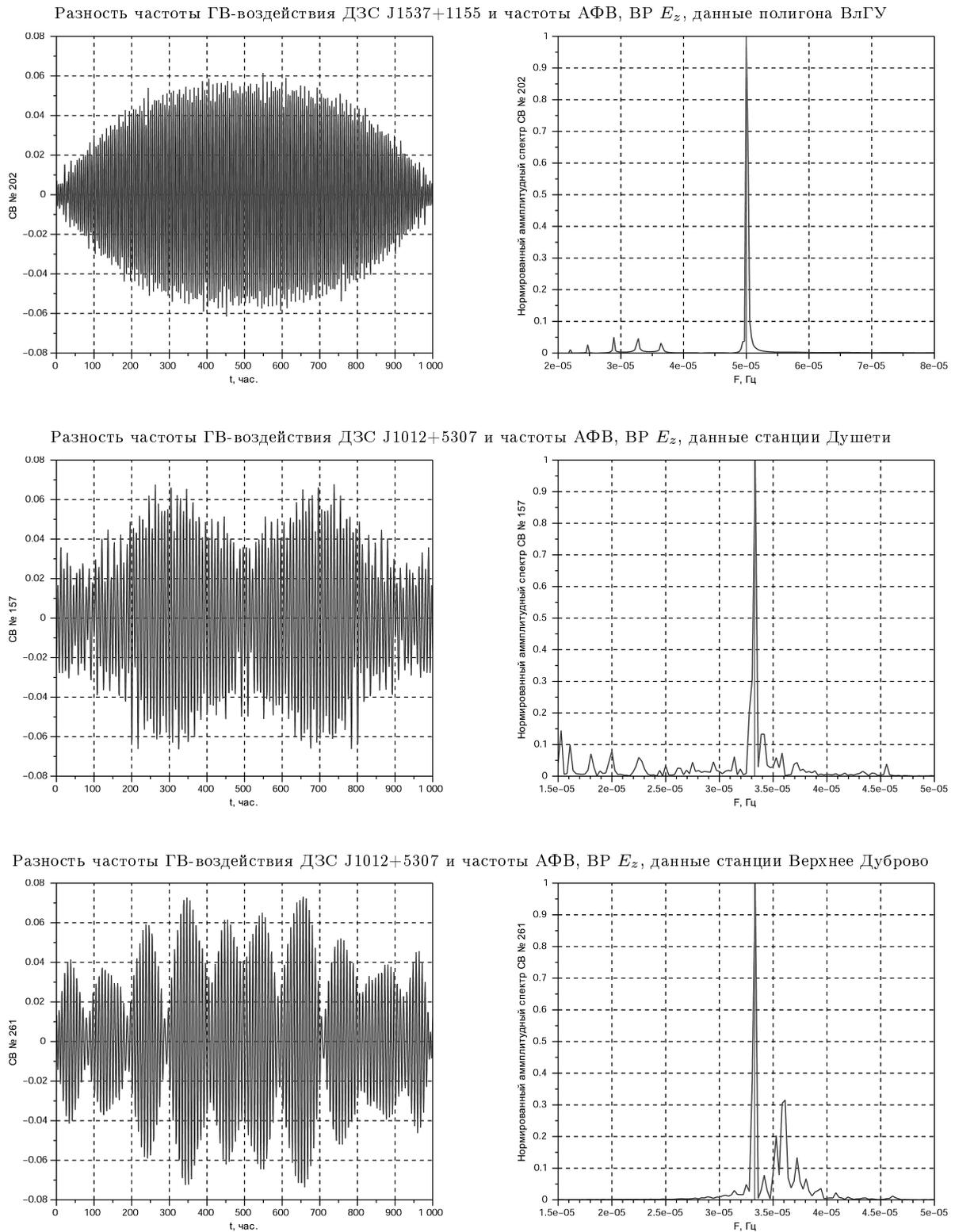


Рис. 9. Собственные векторы (слева), локализованные на комбинационных частотах ГВ-воздействия ДЗС и АФВ, и их амплитудные спектры (справа). Сплошная вертикальная линия на графиках спектров соответствует выявляемой частоте

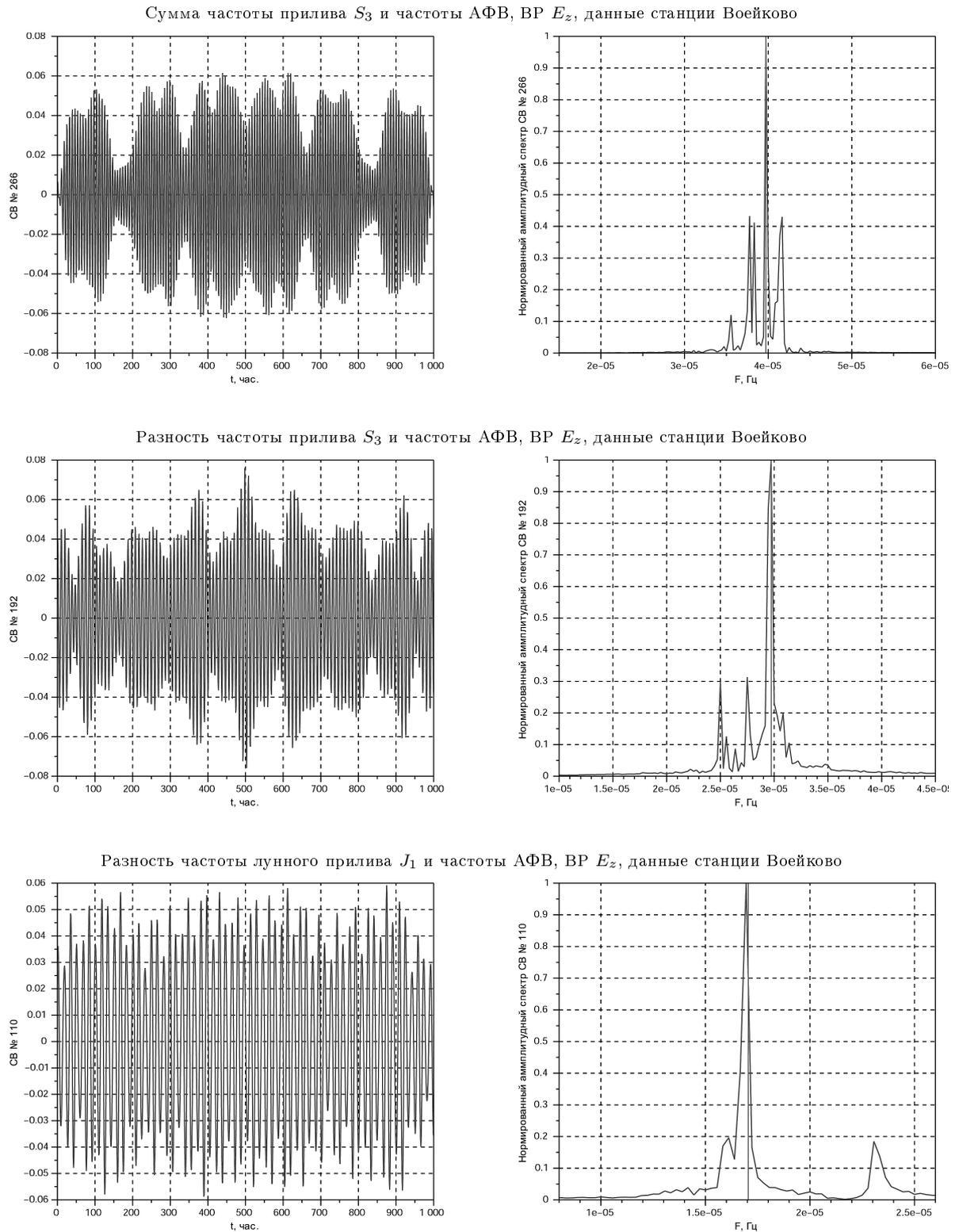


Рис. 10. Собственные векторы (слева), локализованные на комбинационных частотах лунно-солнечных приливов и АФВ, и их амплитудные спектры (справа). Сплошная вертикальная линия на графиках спектров соответствует выявляемой частоте

Заключение

1. Показано, что компоненты временных рядов (ВР) вертикальной составляющей электрического поля (E_z) в пограничном слое атмосферы Земли, локализованные на частотах гравитационного воздействия двойных звёздных систем и частоте аксион-фотонного взаимодействия, некогерентны. Это приводит к тому, что с увеличением интервала анализа спектральные оценки, полученные с помощью классической квадратурной схемы, уменьшаются; таким образом, с использованием квадратурной схемы составляющие, локализованные на этих частотах, ненаблюдаемы.
2. С использованием анализатора собственных векторов и компонент сигнала [3] (АСВиКС) выявлены с высокой достоверностью некогерентные составляющие, локализованные на частотах гравитационно-волнового воздействия двойных звёздных систем. Вероятность ложного выявления по всем проанализированным временным рядам E_z не превышает 10^{-9} .
3. С использованием АСВиКС выявлены некогерентные составляющие, спектрально локализованные на частоте аксион-фотонного взаимодействия $5 \cdot 10^{-6}$ Гц. Вероятность ложного выявления по всем проанализированным временным рядам E_z не превышает 0.06.
4. Обнаружен факт амплитудных модуляций некогерентных составляющих, спектрально локализованных на частотах гравитационно-волнового воздействия двойных звёздных систем, с модулирующей частотой, совпадающей с частотой аксион-фотонного взаимодействия. Вероятность ложного обнаружения факта таких модуляций по всем проанализированным временным рядам E_z ничтожно мала и не превышает $1.5 \cdot 10^{-15}$. Обнаружение таких модуляций с высокой достоверностью подтверждает факт аксион-фотонного взаимодействия.
5. Выдвинута и предварительно подтверждена гипотеза о широком распространении среди квазипериодических компонент вертикальной составляющей электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли компонент, модулированных частотой аксион-фотонного взаимодействия, равной $5 \cdot 10^{-6}$ Гц.

Использованные сокращения

АСВиКС	анализатор собственных векторов и компонент сигнала
АФВ	аксион-фотонное взаимодействие
БГШ	белый гауссовский шум
БПФ	быстрое преобразование Фурье
ВР	временной ряд
ГВ	гравитационно-волновой
ДЗС	двойная звёздная система
ИК	индекс когерентности
ИНЧ	инфранизкочастотный
НССЗ	нормированный спектр собственных значений
СВ	собственный вектор
СЗ	собственное значение
ССЗ	спектр собственных значений

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исакевич В.В., Грунская Л.В., Исакевич Д.В. Выявление спектрально локализованных компонент на частотах лунных приливов во временных рядах вертикальной составляющей электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли. Пространство, время и фундаментальные взаимодействия.
2. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Закиров А.А., Рубай Д.В., Исакевич Д.В., Батин А.С. Программно-аппаратный комплекс исследования электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. №6. С. 42–49.
3. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В. Анализатор собственных векторов и компонент сигнала. Патент РФ на полезную модель №116242 от 30.09.2011. URL: <http://bankpatentov.ru/node/207042>
4. Bocaletti D., De Sabbata V., Fortini P. and Gualdi C. Conversion of photons into gravitons and vice versa in a static electromagnetic field. II Nuovo Cimento, 1970, B70 pp.129–146.
5. Гинзбург В. Л., Цитович В. Н. Переходное излучение и переходное рассеяние. М.: Наука, 1984. 360 с.

6. Zel'dovich Y.B. Electromagnetic and gravitational waves in a stationary magnetic field. Soviet Physics JETP. 1974, 38, p.652.
7. Balakin A.B., Vakhrushev D.V. Critical character of gravitational wave modulation of electric and magnetic fields in isotopic media. Russian Physics Journal, 1993, 36, 833.
8. Balakin A.B., Lemos J.P.S. Singular behaviour of electric and magnetic fields in dielectric media in a nonlinear gravitational wave background Class. Quantum Grav. 2001, 18, 941.
9. Balakin A.B., Wei-Tou Ni. Anomalous character of the axion-photon coupling in a magnetic field distorted by a pp-wave gravitational background. // Classical and Quantum Gravity, 2014, vol. 31, №10, 105002 (21 pp.).
10. Малюков В.К., Руденко В.Н. Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1991. Т. 41. С. 147–193.
11. Balakin A.B., Grunskaya L.V. Axion electrodynamics and dark matter fingerprints in the terrestrial magnetic and electric fields. Reports on Mathematical Physics, Vol. 71, №1, pp. 45-67, 2013.
12. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Рубай Д.В., Золотов А.Н. Исследование воздействия лунных приливов на электромагнитное поле пограничного слоя атмосферы с помощью метода собственных векторов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. №4. С. 65–70.
13. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Батин А.С. Программное обеспечение для анализа собственных векторов ковариационных матриц временных рядов. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения №2008614391, 2008.
14. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Батин А.С. Программное обеспечение для распределенной обработки данных в среде Lotus Notes/Domino. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения №2012616590, 2012.

Поступила в редакцию 30.05.2014

Грунская Любовь Валентиновна, д. т. н., профессор, кафедра общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет, 600001, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87.

E-mail: grunsk@vlsu.ru

Исакевич Валерий Викторович, к. т. н., старший научный сотрудник, кафедра общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет, 600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87; директор по развитию, общество с ограниченной ответственностью «БизнесСофтСервис», 600001, Россия, г. Владимир, ул. Большая Московская, 61.

E-mail: businesssoftservice@gmail.com

Исакевич Даниил Валерьевич, инженер-исследователь, кафедра общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет, 600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87; технический директор, общество с ограниченной ответственностью «БизнесСофтСервис», 600001, Россия, г. Владимир, ул. Большая Московская, 61.

E-mail: voiceofhope@yandex.ru

Сушкова Людмила Тихоновна, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой биомедицинских и электронных технологий и средств, Владимирский государственный университет, 600001, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87.

E-mail: ludm@vlsu.ru

L. V. Grunskaya, V. V. Isakevich, D. V. Isakevich, L. T. Sushkova

Detection of Earth electric field components spectrally localized on frequencies of the Lunar tides

Keywords: gravitational wave radiation, axion-photon interaction, electric field of Earth, eigenvector, eigenvalue, coherence.

PACS: 92.60.Pw, 04.80.Nn, 14.80.Va

Using the patented eigenvector and signal components analyser the time series of vertical electric field E_z in boundary layer of the Earth's atmosphere are researched. Non-coherent complex periodic components which consist of frequencies located near the gravitation waves sources and axion-photon interaction are detected. These components cannot be observed using the classic quadrature scheme of spectral analysis and have active values from 0.05 to 0.5 V/m at gravitation wave source frequencies and from 0.7 to 2.7 V/m at axion-photon interaction frequency. The probability of random eigenvector spectral localization on the mentioned frequencies is limited with 10^{-9} for GW frequencies and 0.06 for axion-photon interaction. The components which are spectrally localized at summary and difference frequencies of gravitation wave sources and axion-photon interaction are detected in all considered time series with active values from 0.05 to 0.59 V/m — which is evidence of amplitude modulation of gravitation wave frequencies with axion-photon interaction frequency. The false detection probability for these modulations is $1.9 \cdot 10^{-6}$ – $4.3 \cdot 10^{-3}$ for specific time series, the total false detection probability is less than $1.2 \cdot 10^{-15}$.

REFERENCES

1. Isakevich V.V., Grunskaya L.V., Isakevich D.V. Detection of Earth electric field components spectrally localized on frequencies of the Lunar tides. *Prostranstvo, vremya i fundamental'nye vzaimodeistviya (Space, time and fundamental interactions)*.
2. Grunskaya L.V., Isakevich V.V., Zakirov A.A., Rubai D.V., Isakevich D.V., Batin A.S. The program-analytical system to investigate the electromagnetic field of the atmosphere surface boundary level. *Biomedicinskaya radioelektronika (Biomedical radioelectronics)*. 2012. №6. pp. 42–49.
3. Grunskaya L.V., Isakevich V.V., Isakevich D.V. Eigenvector and signal component analyzer. Utility model patent RU №116242.
4. Bocaletti D., De Sabbata V., Fortini P. and Gualdi C. Conversion of photons into gravitons and vice versa in a static electromagnetic field. *Il Nuovo Cimento*, 1970, B70 pp.129–146.
5. Ginzburg V.L., Tzytovich V.N. *Transitional radiation and transitional dispersion*. Moscow, «Nauka» («Science»), 1984. 360 pp.
6. Zel'dovich Y.B. Electromagnetic and gravitational waves in a stationary magnetic field. *Soviet Physics JETP*. 1974, 38, p.652.
7. Balakin A.B., Vakhrushev D.V. Critical character of gravitational wave modulation of electric and magnetic fields in isotopic media. *Russian Physics Journal*, 1993, 36, 833.
8. Balakin A.B., Lemos J.P.S. Singular behaviour of electric and magnetic fields in dielectric media in a nonlinear gravitational wave background *Class. Quantum Grav.* 2001, 18, 941.
9. Balakin A.B., Wei-Tou Ni. Anomalous character of the axion-photon coupling in a magnetic field distorted by a pp-wave gravitational background. *Classical and Quantum Gravity*, 2014, vol. 31, №10, 105002 (21 pp.).
10. Malyukov V.K., Rudenko V.N. *Scientific and technical results*. Moscow, All-Russian institute of scientific and technical information, 1991. V. 41, pp. 147–193.
11. Balakin A.B., Grunskaya L.V. Axion electrodynamics and dark matter fingerprints in the terrestrial magnetic and electric fields. *Reports on Mathematical Physics*, Vol. 71, №1, pp. 45–67, 2013.
12. Grunskaya L.V., Isakevich V.V., Isakevich D.V., Rubai D.V., Zolotov A.N. Research of Lunar tides influence to Earth's atmosphere boundary layer electromagnetic field using eigenvector method, *Izv. Vyssh. Obr. Uchr. Fizika*, 2013, no. 4 (56), pp. 65–70.
13. Isakevich V.V., Isakevich D.V., Batin A.S. Program for time series covariance matrix eigenvector analysis. Federal registration certificate №2008614391, 2008.
14. Isakevich V.V., Isakevich D.V., Batin A.S. Program for distributed data processing on Lotus Notes/Domino platform. Federal registration certificate №2012616590, 2012.

Received 30.05.2014

Grunskaya Lyubov Valentinovna, Doctor of Science, Professor, Department of General and Applied Physics, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia.
E-mail: grunsk@vlsu.ru

Isakevich Valery Victorovich, Doctor of Philosophy, Senior Researcher, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia; Chief Development Officer, BusinessSoftService Ltd, ul. B. Moskovskaya, 61, Vladimir, 600001, Russia.
E-mail: businesssoftservice@gmail.com

Isakevich Daniel Valerievich, Engineering Researcher, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia; Chief Technical Officer, BusinessSoftService Ltd, ul. B. Moskovskaya, 61, Vladimir, 600001, Russia.
E-mail: voiceofhope@yandex.ru

Sushkova Ludmila Tikhonovna, Doctor of Science, Professor, Department of Biomedical and Electronic Means and Technologies, Vladimir State University, ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia.
E-mail: ludm@vlsu.ru

УДК 530.1

*А. Б. Балакин*¹

**АКСИОННАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ:
ПОИСК СИГНАЛОВ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ**

Аксионная электродинамика возникла как расширение классической теории Фарадея-Максвелла и призвана учесть взаимодействие фотонов с псевдоскалярным полем, переносчики которого (гипотетические массивные Голдстоуновские псевдобозоны, именуемые аксионами) составляют (согласно современным теоретическим оценкам) значительную долю массовой плотности космической темной материи. В окружении реликтовых аксионов, формирующих темную материю, отклик электромагнитного поля в Земной атмосфере приобретает новые удивительные свойства, одним из которых является аномальное усиление сигналов, индуцированных периодическим гравитационным излучением от так называемых гравитационно-волновых маяков - релятивистских компактных двойных систем. Цель данной заметки - обратить внимание читателей на публикуемые в данном номере журнала результаты многолетних измерений вариаций электрического и магнитного полей в приземном слое, выполненных группой исследователей Владимирского университета. На мой взгляд представленные моими коллегами результаты могли бы служить подтверждением гипотезы о том, что среди внешних источников исследуемых инфра-низкочастотных вариаций электрического и магнитного полей имеются удаленные источники гравитационно-волновой природы. Расчеты и оценки, приводимые ниже, могли бы служить объяснением высокой чувствительности Земной аксионно-активной электродинамической системы к периодическим воздействиям гравитационно-волнового типа.

Ключевые слова: Аксионная электродинамика, гравитационные волны, атмосфера Земли.

PACS: 04.20.-q, 04.20.Jb, 14.80.Nv, 04.20.Gz

Введение

В своей заметке я хотел бы затронуть некоторые теоретические проблемы, связанные с интерпретацией экспериментальных результатов, представленных Владимирскими коллегами в первых трех статьях данной серии. Основой для интерпретации служат точные решения уравнений аксионной электродинамики, которые демонстрируют возможность аномального усиления электрического сигнала за счет аксион-фотонного взаимодействия во внешнем гравитационно-волновом поле. Данную заметку следует рассматривать как краткий обзор точных решений электродинамических уравнений в поле гравитационного излучения, полученных в работах [1–4].

**1. Математическое моделирование аномального отклика
электрического и магнитного полей в поле гравитационного излучения**

1.1. Электродинамические модели без аксион-фотонных взаимодействий

Электродинамические модели данного типа формулируются с помощью функционала действия

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{R}{2\kappa} + L_{(m)} + \frac{1}{4} C^{ikmn} F_{ik} F_{mn} \right]. \tag{1.1}$$

Здесь использованы следующие стандартные обозначения: g - это детерминант метрического тензора g_{ik} , R - скаляр Риччи, $\kappa = \frac{8\pi G}{c^4}$ - Эйнштейновская константа. Как обычно, F_{mn} - это тензор Максвелла, связанный с 4-вектором потенциала электромагнитного поля A_i соотношением

$$F_{ik} = \nabla_i A_k - \nabla_k A_i, \tag{1.2}$$

где ∇_i - ковариантная производная. Скаляр $L_{(m)}$ описывает Лагранжиан материальной среды, а C^{ikmn} есть тензор линейного отклика этой среды. Если среда пространственно изотропна и перемещается с макроскопической скоростью U^i , то этот тензор можно представить в виде:

$$C^{ikmn} = \frac{1}{2\mu} [(g^{im} g^{kn} - g^{in} g^{km}) + (n^2 - 1) (g^{im} U^k U^n - g^{in} U^k U^m + g^{kn} U^i U^m - g^{km} U^i U^n)]. \tag{1.3}$$

¹E-mail: Alexander.Balakin@kpfu.ru

Здесь n - это показатель преломления среды, определенный соотношением $n^2 = \varepsilon\mu$, где ε и μ - это скаляры диэлектрической и магнитной проницаемости среды. В вакууме $\varepsilon=1$, $\mu=1$ и $n^2=1$, и мы получаем модель гравитационно-волнового (ГВ) вакуума, для которой скаляр $C^{ikmn}F_{ik}F_{mn}$ превращается в первый инвариант электромагнитного поля $F^{ik}F_{ik}$. Уравнения электродинамики для непроводящей электрически нейтральной среды включают две подсистемы:

$$\nabla_k [C^{ikmn}F_{mn}] = 0, \quad \nabla_k F^{*ik} = 0, \quad (1.4)$$

где $F^{*mn} \equiv \frac{1}{2}\epsilon^{mnpq}F_{pq}$ - это тензор, дуальный тензору Максвелла, а $\epsilon^{mnpq} \equiv \frac{1}{\sqrt{-g}}E^{mnpq}$ есть тензор Леви-Чивита с абсолютно антисимметричным символом E^{mnpq} ($E^{0123} = 1$).

Поле гравитационного излучения моделируется пространственно-временным фоном с метрикой

$$ds^2 = 2dudv - L^2 [e^{2\beta}(dx^2)^2 + e^{-2\beta}(dx^3)^2]. \quad (1.5)$$

(Детали, используемые предположения и ограничения можно найти работе [4]). Среди обозначений выделим запаздывающее время $u = \frac{ct-x^1}{\sqrt{2}}$, опережающее время $v = \frac{ct+x^1}{\sqrt{2}}$, и подчеркнем, что функции $L(u)$, $\beta(u)$ зависят только от u и характеризуются следующими начальными данными при $u = 0$:

$$L(0) = 1, \quad L'(0) = 0, \quad \beta(0) = 0, \quad \beta'(0) = 0. \quad (1.6)$$

Пусть до появления гравитационной волны (т.е., при $u < 0$) три компоненты магнитного поля $B^{(1)}$, $B^{(2)}$, $B^{(3)}$ были заданы ненулевыми константами, а компоненты электрического поля отсутствовали, $E^{(1)}=0$, $E^{(2)}=0$, $E^{(3)}=0$. Тогда, как показано в работах [1, 2], при $n^2 \neq 1$ существует точное решение уравнений электродинамики, зависящее только от запаздывающего времени:

$$B^1(u) = \frac{B^{(1)}}{L^2}, \quad \mathcal{E}^1(u) = 0, \quad (1.7)$$

$$B^2 = \frac{B^{(2)}}{L} \left[\cosh \beta + \left(\frac{n^2+1}{n^2-1} \right) \sinh \beta \right], \quad \mathcal{E}^2 = -\frac{2B^{(3)} \sinh \beta}{L(n^2-1)}, \quad (1.8)$$

$$B^3 = \frac{B^{(3)}}{L} \left[\cosh \beta - \left(\frac{n^2+1}{n^2-1} \right) \sinh \beta \right], \quad \mathcal{E}^3 = -\frac{2B^{(2)} \sinh \beta}{L(n^2-1)}. \quad (1.9)$$

В этом точном решении обращает на себя внимание множитель $\frac{\sinh \beta}{n^2-1}$, который ведет себя аномальным образом. Действительно, если вычислить двойной предел в последовательности $\beta \rightarrow 0$, а затем $n^2 \rightarrow 1$, получим нулевой результат: $\lim_{n^2 \rightarrow 1} \lim_{\beta \rightarrow 0} \left\{ \frac{\sinh \beta}{n^2-1} \right\} = 0$. Если же устремить сначала $n^2 \rightarrow 1$, а затем $\beta \rightarrow 0$, получим бесконечный двойной предел $\lim_{\beta \rightarrow 0} \lim_{n^2 \rightarrow 1} \left\{ \frac{\sinh \beta}{n^2-1} \right\} = \infty$. Поскольку указанные двойные пределы не совпадают, мы имеем дело с классическим критическим поведением отклика в окрестности значения $n^2=1$. В отсутствие гравитационной волны $\beta \equiv 0$, так что данная проблема не возникает.

Если решать исходную электродинамическую задачу при условии $n^2 \equiv 1$, решение, зависящее только от запаздывающего времени заменяется на точное решение, которое линейно по опережающему времени. Формально говоря, оно может быть получено заменой выражения $\frac{\sinh \beta}{n^2-1}$ на $v\beta'(u)$ в формулах (1.8) и (1.9). В данном контексте следует говорить не о критическом поведении сигнала, а о более привычном резонансном росте амплитуды сигнала-отклика электродинамической системы на воздействие гравитационной волны.

1.2. Электродинамические модели, включающие аксион-фотонные взаимодействия

Аксионная электродинамика, основы которой заложены в работах [5-7], может быть сформулирована с помощью расширенного функционала действия

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{R+2\Lambda}{2\kappa} + L_{(\text{matter})} + \frac{1}{4} C^{ikmn} F_{ik} F_{mn} + \frac{1}{4} \phi F_{mn}^* F^{mn} + \frac{1}{2} \Psi_0^2 \left[-g^{mn} \nabla_m \phi \nabla_n \phi + m_{(A)}^2 (\phi^2 - \phi_*^2) + \frac{1}{2} \lambda (\phi^2 - \phi_*^2)^2 \right] \right], \quad (1.10)$$

в котором появилась новая полевая переменная - псевдоскалярное (аксионное) поле ϕ , его 4-градиент $\nabla_k \phi$, аксионная масса $m_{(A)}$, аксионное вакуумное среднее ϕ_* и константа λ , вводящая

ϕ^4 -вклад в потенциал аксионного поля. В данной модели электродинамическая подсистема уравнений

$$\nabla_k [F^{ik} + (n^2 - 1)(F^{im}U^k - F^{km}U^i)U_m] = -\mu F^{*ik}\nabla_k\phi, \quad \nabla_k F^{*ik} = 0, \quad (1.11)$$

дополняется уравнением для аксионного поля

$$\left[\nabla^k \nabla_k + m_{(A)}^2 + \lambda(\phi^2 - \phi_*^2) \right] \phi = -\frac{1}{4\Psi_0^2} F_{mn}^* F^{mn}. \quad (1.12)$$

Решение задачи об эволюции первоначально постоянного магнитного поля под влиянием гравитационного излучения дает в данной модели результаты, которые существенно отличаются для случаев, когда среда есть аксионный вакуум ($n^2=1$), и когда среда имеет неединичный показатель преломления. Рассмотрим эти два случая отдельно.

Пусть $n^2 \neq 1$. Тогда точное решение для компонент магнитного и электрического полей вновь зависит только от запаздывающего времени и имеет вид

$$\mathcal{B}^1(u) = \frac{B^{(1)}}{L^2}, \quad \mathcal{E}^1(u) = -\frac{B^{(1)}}{\varepsilon L^2} \phi(u), \quad (1.13)$$

$$\mathcal{B}^2 = \frac{1}{L} \left\{ B^{(2)} \left[\cosh \beta + \left(\frac{n^2+1}{n^2-1} \right) \sinh \beta \right] + \frac{\mu\phi(u)}{(n^2-1)} e^{-\beta} B^{(3)} \right\}, \quad (1.14)$$

$$\mathcal{B}^3 = \frac{1}{L} \left\{ B^{(3)} \left[\cosh \beta - \left(\frac{n^2+1}{n^2-1} \right) \sinh \beta \right] - \frac{\mu\phi(u)}{(n^2-1)} e^{\beta} B^{(2)} \right\}, \quad (1.15)$$

$$\mathcal{E}^2 = -\frac{1}{L(n^2-1)} \left[2B^{(3)} \sinh \beta + \mu\phi(u) e^{\beta} B^{(2)} \right], \quad (1.16)$$

$$\mathcal{E}^3 = -\frac{1}{L(n^2-1)} \left[2B^{(2)} \sinh \beta + \mu\phi(u) e^{-\beta} B^{(3)} \right]. \quad (1.17)$$

Другими словами, особенность при $n^2 \rightarrow 1$ наследуется, а кроме того появляются перекрестные слагаемые, пропорциональные величине аксионного поля:

$$\phi(u) = -\frac{\varepsilon L^2 B_{\perp}^2 \sin 2\Theta \sinh 2\beta}{(n^2-1) \left(\varepsilon \Psi_0^2 L^4 m_{(A)}^2 + B^{(1)2} \right) + n^2 L^2 B_{\perp}^2 (\cosh 2\beta + \cos 2\Theta \sinh 2\beta)}. \quad (1.18)$$

При $n^2 \equiv 1$ соответствующее решение для аксионного поля имеет вид

$$\phi(u) = \phi(0) - 2 \arctan \left[\frac{\sin 2\Theta \sinh \beta(u)}{\cosh \beta(u) + \cos 2\Theta \sinh \beta(u)} \right]. \quad (1.19)$$

Продольное магнитное поле \mathcal{B}^1 остается неискаженным, а продольное электрическое поле

$$\mathcal{E}^1(u) = \frac{2B^{(1)}}{L^2} \arctan \left[\frac{\sin 2\Theta \sinh \beta}{\cosh \beta + \cos 2\Theta \sinh \beta} \right] \quad (1.20)$$

порождается аксион-фотонным взаимодействием. Поперечные компоненты полей удобно представить в виде:

$$\mathcal{B}^2 = L e^{\beta} B^{(2)} [1 + X(u, v) + Z(u)], \quad \mathcal{B}^3 = L e^{-\beta} B^{(3)} [1 + X(u, v) - Z(u)], \quad (1.21)$$

$$\mathcal{E}^2 = \frac{B^{(3)}}{L} e^{\beta} [-Y(u, v) - Z(u)], \quad \mathcal{E}^3 = \frac{B^{(2)}}{L} e^{-\beta} [Y(u, v) - Z(u)], \quad (1.22)$$

где функции, описывающие искажение полей, имеют вид

$$X(u, v) = \frac{1}{2} [a(u) - 1 - va'(u)], \quad Y(u, v) = \frac{1}{2} [a(u) - 1 + va'(u)], \quad (1.23)$$

$$Z(u) = \frac{2\Psi_0^2 L^2}{a(u) B_{\perp}^2 \sin 2\Theta} \left[\mathcal{H}(\phi) + \frac{(B^{(1)})^2}{L^4 \Psi_0^2} \right] \arctan \left[\frac{\sin 2\Theta \sinh \beta}{\cosh \beta + \cos 2\Theta \sinh \beta} \right], \quad (1.24)$$

а вспомогательные функции заданы соотношениями

$$a(u) \equiv \frac{1}{\sqrt{\cosh 2\beta(u) + \cos 2\Theta \sinh 2\beta(u)}}, \quad a(0) = 1, \quad (1.25)$$

$$\mathcal{H}(\phi) \equiv m_{(A)}^2 + \lambda [\phi^2 + \phi\phi(0) + \phi^2(0) - \phi_*^2], \quad (1.26)$$

$$B^{(2)} = B_{\perp} \cos \Theta, \quad B^{(3)} = B_{\perp} \sin \Theta. \quad (1.27)$$

Очевидно, что резонансный характер воздействия поля ГВ на электродинамическую систему наследуется в данной аксионно расширенной модели, но кроме этого появляется новый элемент, позволяющий говорить об аномальном характере воздействия поля ГВ в присутствии аксионов. Действительно, в общем случае, когда $\Psi_0^2 m_{(A)}^2 \neq 0$, $\beta(u) \neq 0$ и $B_{\perp} \neq 0$, функция $Z(u)$ содержит $B_{\perp}^2 \neq 0$ в знаменателе. Формально это означает, что в присутствии поля ГВ электромагнитный отклик увеличивается с уменьшением поперечного магнитного поля $B_{\perp}^2 \rightarrow 0$. Однако, если $B_{\perp}^2 \equiv 0$ тождественно, соответствующее точное решение демонстрирует отсутствие эффекта. Понятно, что мы опять сталкиваемся с критическим поведением отклика, ибо $\lim_{B_{\perp} \rightarrow 0} \{F_{ik}(B_{\perp})\} = \infty \neq \{F_{ik}(B_{\perp}=0)\}$, если $\beta \neq 0$.

Таким образом, в предъявленных точных решениях действительно присутствуют формальные признаки аномального поведения отклика электродинамической системы, окруженной массивными аксионами, на воздействие гравитационного излучения. В следующем разделе мы обсудим физическую природу указанных аномалий и оценки величины предсказанного эффекта.

2. Оценки коэффициента усиления отклика аксионно-активной электродинамической системы на действие гравитационного излучения

В качестве иллюстрации рассмотрим релятивистскую двойную систему J0737–3039(A, B) как гравитационно-волновой маяк. Её орбитальный период составляет $P_b=0.102251563$ суток при темпе замедления $\dot{P}_b = -1.21 \cdot 10^{-12}$ (см. [8]). Рабочая ГВ-частота составляет $\nu_{\text{gw}} = 2\nu_b = \frac{2}{P_b} \simeq 2.3 \cdot 10^{-4}$ Гц, а безразмерная амплитуда ГВ в окрестности Земли оценивается как $\beta_0 \simeq 10^{-23}$.

Для оценки амплитуды вариаций магнитного $\delta\mathcal{B}$ и электрического $\delta\mathcal{E}$ полей, индуцированных полем ГВ с безразмерной амплитудой β_0 , удобно использовать соотношение

$$\left| \frac{\delta\mathcal{B}}{B_{\perp}} \right| = \beta_0 \mathcal{Q} = \left| \frac{\delta\mathcal{E}}{B_{\perp}} \right|, \quad (2.1)$$

где B_{\perp} - это амплитуда невозмущенного поперечного магнитного поля, а \mathcal{Q} - так называемая эффективная добротность электродинамической системы. Величина \mathcal{Q} находится из точных решений, представленных выше (см. подробности в работе [4]).

2.1. Оценка коэффициента усиления в модели аксионного вакуума ($n^2 \equiv 1$)

Положим для простоты, что $B^{(1)}=0$ и представим эффективную добротность \mathcal{Q} как сумму трех слагаемых

$$\mathcal{Q} \simeq 1 + 0.5\omega_0 T_0 + \frac{\Psi_0^2 m_{(A)}^2}{B_{\perp}^2}. \quad (2.2)$$

Первое слагаемое отвечает стандартной вариации электрического и магнитного полей слабым гравитационно-волновым полем; мы не пытаем надежд выделить из шума эту часть сигнала, однако, именно её многие коллеги до сих пор принимают за истинный отклик на действие ГВ.

Второе слагаемое содержит время T_0 , в течение которого сигнал наблюдается (и усредняется), и частоту ГВ, обозначенную как ω_0 . Если рассчитывать на годовую серию непрерывной регистрации сигнала ($T_0=365$ суток), второе слагаемое в (2.2) может оказаться порядка 10^4 .

Третье слагаемое в (2.2) дает самые оптимистические оценки, причем в настоящее время разброс этих оценок весьма велик. Например, параметр Ψ_0 есть величина, обратная константе аксион-фотонных взаимодействий $g_{A\gamma\gamma}$, т.е., $\frac{1}{\Psi_0} = g_{A\gamma\gamma}$. Современные оценки дают для этого параметра интервал $10^{-12} \text{ ГэВ}^{-1} < g_{A\gamma\gamma} < 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-1}$, поэтому для иллюстрации возьмем $g_{A\gamma\gamma} \simeq 10^{-6} \text{ ГэВ}^{-1}$ и $\Psi_0 \simeq 10^{15} \text{ эВ}$ (в натуральной системе единиц с $c=\hbar=1$). Соответственно, в гауссовой системе единиц получим $\Psi_0 \simeq 3 \cdot 10^{11} \text{ г}^{\frac{1}{2}} \text{ см}^{\frac{1}{2}} \text{ с}^{-1}$. На массу аксиона имеются ограничения $10^{-6} \text{ эВ} < m_{(A)} < 1$

эв. Для иллюстрации возьмем предельную оценку и будем считать, что масса аксиона в 10^{12} раз меньше массы электрона, т.е., в гауссовой системе единиц $m_{(A)} \simeq 2.7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Иными словами для оценки величины параметра $\Psi_0 m_{(A)}$ воспользуемся величиной $8 \cdot 10^9 \text{ г}^{\frac{1}{2}} \text{ см}^{-\frac{1}{2}} \text{ с}^{-1}$. Для оценки величины Земного магнитного поля воспользуемся значением $B_{\perp} = 0.5 \text{ Гс}$, тогда третье слагаемое в (2.2) оказывается порядка $2 \cdot 10^{20}$. Если в качестве массы аксиона взять среднее по оценочному интервалу значение $m_{(A)} \rightarrow 10^{-3} \text{ эв}$, мы получим, что добротность \mathcal{Q} увеличится на шесть порядков. Если амплитуду гравитационных волн оценивать как $\beta_0 \simeq 10^{-23}$, а эффективную добротность как $\mathcal{Q} \simeq 10^{20}$, то индуцированные полем ГВ вариации магнитного и электрического поля составят тысячную долю от величины геомагнитного поля (напомним, что все оценки производились в системе единиц, в которой электрическое поле и магнитная индукция имеют одинаковую размерность).

2.2. Оценка коэффициента усиления в модели с $n^2 \neq 1$

Для данной модели эффективная добротность определяется множителем $\mathcal{Q} = \frac{1}{(n^2-1)}$, и главный вопрос состоит в том, насколько близким к единице может оказаться коэффициент преломления n . Чисто теоретически можно создать глубокий вакуум, избавившись от молекул и атомов, однако, избавиться от реликтовых аксионов, создающих всепроникающую темную материю, экспериментаторам не удастся. Иными словами, предельно малое значение величины $n^2 - 1 \equiv \chi$ определяется диэлектрической восприимчивостью аксионной темной материи (мы полагаем здесь $\mu=1$).

Если воспользоваться аналогией с классической молекулярной физикой, то величина χ может быть смоделирована формулой $\chi = \frac{4\pi}{3} \alpha N$, где N - число молекул в единице объема, а α - восприимчивость индивидуальной молекулы. Для оценки плотности аксионной темной материи в окрестности Земли можно воспользоваться данными, приведенными для Солнечной системы, $\rho_{(DM)} \simeq 0.033 M_{(Sun)}$ парсек $^{-3}$, или в натуральной системе единиц $\rho_{(DM)} \simeq 1.25 \text{ Гэв} \cdot \text{см}^{-3}$. Тогда число аксионов в одном кубическом сантиметре оценивается как $N_{(A)} \simeq 10^{15}$. Предположим также, что аксионная восприимчивость $\alpha_{(A)}$ в 10^{11} раз меньше молекулярной, ибо именно во столько раз электромагнитное взаимодействие сильнее слабого. Тогда, имея в виду, что молекулярная восприимчивость имеет типичный порядок $\alpha \simeq 10^{-24} \text{ см}^3$, получим предельную оценку $\mathcal{Q} = \frac{1}{\chi} \simeq 10^{20}$. Если использовать для оценок массу аксиона на три порядка выше, число аксионов в единице объема при заданной плотности темной материи станет на три порядка меньше, следовательно, параметр \mathcal{Q} увеличится на три порядка. Следовательно, как и в предыдущей модели, для ГВ с амплитудой $\beta_0 \simeq 10^{-23}$ и эффективной добротностью $\mathcal{Q} \simeq 10^{20}$ индуцированные полем ГВ вариации магнитного и электрического поля составят тысячную долю от величины геомагнитного поля.

3. Вместо послесловия

Отклик аксионно-активной электродинамической системы на действие гравитационных волн, как следует из предыдущих рассуждений, может оказаться вдохновляюще высок. Вариация, составляющая тысячную долю от стационарной величины геомагнитного поля, выглядит как обескураживающе мощный сигнал по сравнению с тем, что привыкли ожидать «охотники за гравитационными волнами». Однако, сам по себе этот сигнал все равно еще достаточно слаб, и нужны весьма серьезные усилия и для его обнаружения, и для его идентификации. Для этого Владимирская группа разработала специальную программу поиска и отождествления ИНЧ-сигналов на частотах ГВ-маяков с учетом специфики аксион-фотонных взаимодействий. Оставаясь в рамках чисто теоретических рассуждений, я хотел бы обратить внимание читателей на три важных и весьма тонких момента, обнаруженных в процессе расчетов.

Во-первых, следует предостеречь читателя от излишне оптимистического взгляда на формулу (2.2), в которой амплитуда магнитного поля оказалась в знаменателе дроби, описывающей эффективную добротность аксионно-активной электродинамической системы. Следует ли думать, что чем слабее магнитное поле, тем сильнее отклик, и что достаточно снять сувенирный магнетик с холодильника и обнаружить с его помощью периодический электрический сигнал с частотой ГВ-маяка? Конечно, нет. Дело в том, что представленные точные решения относятся к стационарному, установившемуся процессу, для которого эффекты включения ГВ-поля остались в далеком прошлом. Другими словами, и включение в схему детектора сувенирного магнетика, и сверхмощного магнита в ЦЕРНе только запускают процесс выхода отклика на стационарный режим, и длиться этот переходный процесс может весьма и весьма долго в силу низкочастотности вынуждающего процесса и слабости поля ГВ. Другими словами, иметь дело следует лишь с теми магнитными полями и с теми гравитационно-волновыми источниками, которые включены давным-давно. Например,

магнитное поле Земли последний раз изменялось структурно около десяти тысяч лет тому назад, когда произошла катастрофа - смена магнитных полюсов; двойная система J0737–3039(A, B), по всей видимости, прислала гравитационные волны на Землю в течение всего этого срока. Это означает, что переход на стационарный режим отклика, возможно, завершен, и у экспериментаторов может появиться шанс обнаружить данный сигнал.

Во-вторых, аксион-фотонные взаимодействия формируют так называемые продольные структуры в электромагнитном поле. Достаточно взглянуть на формулы (1.13)-(1.17), чтобы обнаружить, что при наличии аксионного поля магнитное поле, направленное, например, вдоль оси x^2 , порождает электрическое поле в том же направлении. В отсутствие аксионов при наличии $B^{(2)}$ ГВ могла генерировать только компоненту $E^{(3)}$. В работе [3] мы исследовали формирование продольных структур в магнитном поле Земли в модели, учитывающей кривизну магнитных силовых линий. Гипотеза о существовании аксионно-индуцированных продольных осцилляций магнитного и электрического полей в приземном слое легла в основу новой стратегии обнаружения последствий воздействия поля ГВ на электродинамическую систему в резонаторе Земля-Ионосфера [3].

В-третьих, если аномальное усиление электромагнитного отклика на действие гравитационной волны действительно происходит в атмосфере Земли, логично предположить, что энергия, обеспечивающая поддержание этого процесса, черпается из резервуара, который предоставлен аксионной темной материей. Если темной материи действительно отведены 23% всей энергии Вселенной, этот резервуар следует рассматривать как практически бездонный, и вопрос о перспективности нового направления исследований, связанного с экспериментами по обнаружению аксион-гравитон-фотонных взаимодействий может открыться с новой неожиданной стороны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакин А.Б., Вахрушев Д.В. Критический характер гравитационно-волновой модуляции электрического и магнитного полей в изотропных средах // Известия Высших Учебных Заведений, Физика. 1993. No 9. С. 28–33.
2. Balakin A.B., Lemos J.P.S. Singular behaviour of electric and magnetic fields in dielectric media in a nonlinear gravitational wave background // Classical and Quantum Gravity. Vol. 18. N 5. P. 941–953.
3. Balakin A.B., Grunskaya L.V. Axion electrodynamics and dark matter fingerprints in the terrestrial magnetic and electric fields // Reports on Mathematical Physics. 2013. Vol. 71. N 1. P. 45–67.
4. Balakin A.B., Ni W.-T. Anomalous character of the axion-photon coupling in a magnetic field distorted by a pp-wave gravitational background. // Classical and Quantum Gravity. 2014. Vol. 31. Id. . p.
5. Ni W.-T. Equivalence principles and electromagnetism // Physical Review Letters. 1977. Vol. 38. P. 301–304.
6. Sikivie P. Experimental Tests of the «Invisible» Axion // Physical Review Letters. 1983. Vol. 51. P. 1415–1417.
7. Wilczek F. Two applications of axion electrodynamics // Physical Review Letters. 1987. Vol. 58. P. 1799–1802.
8. Burgay M. et al. An increased estimate of the merger rate of double neutron stars from observations of a highly relativistic system // Nature. 2003. Vol. 426. P. 531–533.

Поступила в редакцию 01.05.2014

Балакин Александр Борисович, д.ф.-м.н., профессор, кафедра теории относительности и гравитации, Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18. E-mail: Alexander.Balakin@kpfu.ru

A. B. Balakin

Axion electrodynamics of the Earth atmosphere: Search for signals induced by gravitational waves

Keywords: Axion electrodynamics, gravitational waves, Earth's atmosphere.

PACS: 04.20.-q, 04.20.Jb, 14.80.Hv, 04.20.Gz

Axion electrodynamics was developed as an extension of the classical Faraday-Maxwell theory, and it takes into account the interaction of photons with a pseudoscalar field; carriers of this field (hypothetic massive Goldstone pseudo-bosons, the so-called axions) form (according to modern theoretical estimations) essential part of the mass-density of the cosmic dark matter. In the environment of the relic axions, which form the dark matter, the response of the electromagnetic field of the Earth atmosphere acquires new surprising properties; one of them is an anomalous amplification of signals induced by the periodic gravitational radiation emitted by the so-called gravitational-wave lighthouses, the relativistic binary systems. The aim of this note is to attract the attention of readers to the results of long-term measurements of the terrestrial magnetic and electric field variations, which were fulfilled by the Vladimir University group and presented in this issue of the journal. My opinion is that these results could be considered as a new argument supporting the hypothesis that among the infra-low-frequency variations of the terrestrial electric and magnetic fields there exist periodic variations induced by external gravitational-wave sources. Calculations and estimations presented below could explain high sensitivity of the Earth axion-active electrodynamic system to the influence of the periodic gravitational waves.

REFERENCES

1. Balakin A.B., Vakhrushev D.V. Critical character of gravitational wave modulation of electric and magnetic fields in isotopic media *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Fizika*. 1993. No 9. P. 28–33.
2. Balakin A.B., Lemos J.P.S. Singular behaviour of electric and magnetic fields in dielectric media in a nonlinear gravitational wave background *Classical and Quantum Gravity*. Vol. 18. N 5. P. 941–953.
3. Balakin A.B., Grunskaya L.V. Axion electrodynamics and dark matter fingerprints in the terrestrial magnetic and electric fields *Reports on Mathematical Physics*. 2013. Vol. 71. N 1. P. 45–67.
4. Balakin A.B., Ni W.-T. Anomalous character of the axion-photon coupling in a magnetic field distorted by a pp-wave gravitational background. *Classical and Quantum Gravity*. 2014. Vol. 31. Id. . p.
5. Ni W.-T. Equivalence principles and electromagnetism *Physical Review Letters*. 1977. Vol. 38. P. 301–304.
6. Sikivie P. Experimental Tests of the «Invisible» Axion *Physical Review Letters*. 1983. Vol. 51. P. 1415–1417.
7. Wilczek F. Two applications of axion electrodynamics *Physical Review Letters*. 1987. Vol. 58. P. 1799–1802.
8. Burgay M. et al. An increased estimate of the merger rate of double neutron stars from observations of a highly relativistic system *Nature*. 2003. Vol. 426. P. 531–533.

Received 01.05.2014

Balakin Alexander Borisovich, Doctor of Sciences, Professor, Department of General Relativity and Gravitation, Institute of Physics, Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya, 18, Kazan, 420008, Russia.
E-mail: Alexander.Balakin@kpfu.ru