

# СОДЕРЖАНИЕ

Том 59, номер 2, 2021

Михаил Игоревич Панасюк 1945–2020	91
О вероятной смене статуса текущего неординарного сбоя 11-летней цикличности Солнца с локального на глобальный <i>В. И. Козлов</i>	92
Разработка проекта реконструкции Гаванской радиоастрономической станции в составе Российских служб Солнца и Космической Погоды <i>В. М. Богод, А. А. Стороженко, А. Г. Тлатов, К. М. Кузаян, А. А. Абуни, С. В. Лесовой, Omar Pons, Marta Uratsuka, Ramses Zaldívar, Sierra Pablo</i>	102
Измерения высоты и размера частиц пост-вулканического аэрозоля на основе поляриметрии сумеречного неба <i>О. С. Угольников, И. А. Маслов</i>	111
Нижняя ионосфера Арктики в июне 2015 г. при сильной магнитной буре и солнечных рентгеновских вспышках по данным затменного радиозондирования на межспутниковых трассах GPS – Formosat <i>С. С. Матюгов, О. И. Яковлев, А. А. Павельев</i>	118
Формирование единого классификатора опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве <i>Е. А. Павлова, М. В. Захваткин, А. И. Стрельцов, В. А. Воропаев, Л. В. Еленин</i>	126
Исследование установившихся движений искусственного спутника Земли в режиме одноосной магнитной ориентации <i>А. И. Игнатов, В. В. Сазонов</i>	135
Реконструкция вращательного движения кораблей <i>Прогресс</i> в режиме одноосной солнечной ориентации по данным измерений тока солнечных батарей <i>М. Ю. Беляев, Т. В. Матвеева, М. И. Монахов, Д. Н. Рулев, В. В. Сазонов</i>	149
Перспективы развития глобальных спутниковых группировок связи в контексте формирования новых сервисов на рынке телекоммуникационных услуг <i>А. А. Харлан, Ш. Н. Биктимиров, А. Б. Иванов</i>	165



## МИХАИЛ ИГОРЕВИЧ ПАНАСЮК 1945–2020

DOI: 10.31857/S0023420621020072



3 ноября на 76-м году жизни скоропостижно скончался член редколлегии журнала “Космические исследования”, доктор физико-математических наук, профессор, директор Научно-исследо-

вательского института ядерной физики МГУ им. М.В. Ломоносова, Михаил Игоревич Панасюк.

Вся жизнь Михаила Игоревича была связана с Научно-исследовательским институтом ядерной физики, в котором он проработал более 50 лет. Научные интересы М.И. Панасюка были связаны с физикой космоса, исследованием радиации, магнитосфер планет и космических лучей с помощью космических и наземных экспериментов. М.И. Панасюк инициировал и осуществил с сотрудниками института космические эксперименты на спутниках *Татьяна-1* (2005) и *Татьяна-2* (2009), *Вернов* (2014), *Нуклон*, *Ломоносов* (2016), а также на спутниках серий *Космос*, *Метеор*, *Электро*, *Глонасс* и *Международной космической станции*. Научные исследования М.И. Панасюка были отмечены премией Минвуза СССР (1985), премией им. М.В. Ломоносова (1999). Он являлся Отличником высшей школы (1987) и Заслуженным работником высшей школы РФ (2005).

М.И. Панасюк вел активную преподавательскую деятельность на физическом факультете МГУ. С 1992 г. профессор М.И. Панасюк руководил Отделением ядерной физики физического факультета МГУ, а с 2005 г. возглавлял Кафедру физики космоса ОЯФ. М.И. Панасюк являлся также членом редколлегии научных журналов “Ядерная физика”, “Известия Российской академии наук. Серия физическая” и “Journal of Astrobiology and Outreach”.

Редколлегия и редакция журнала выражает глубокие соболезнования родным и близким Михаила Игоревича Панасюка.

УДК 523.165+523.74

## О ВЕРОЯТНОЙ СМЕНЕ СТАТУСА ТЕКУЩЕГО НЕОРДИНАРНОГО СБОЯ 11-ЛЕТНЕЙ ЦИКЛИЧНОСТИ СОЛНЦА С ЛОКАЛЬНОГО НА ГЛОБАЛЬНЫЙ

© 2021 г. В. И. Козлов\*

*Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия*

*\*valera.kozlov.42@inbox.ru*

Поступила в редакцию 12.03.2020 г.

После доработки 24.04.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

Обнаруженное по галактическим космическим лучам (ГКЛ) аномальное увеличение площади солнечного цикла 23 явилось предвестником сбоя 11-летней цикличности: в соответствии с гипотезой автора об инварианте 22-летнего цикла, вслед за увеличением площади 23 цикла последовало уменьшение площади (энергоемкости) следующего 24 цикла. Уменьшение энергоемкости сопровождается уменьшением (относительной вариации) светимости Солнца, которая в 24-цикле уменьшилась до уровня среднего значения трех предыдущих циклов, т.е. практически вдвое. При сохранении инварианта 22-летнего цикла следует ожидать восстановления 11-летней цикличности в 25-м цикле. При нарушении инварианта 22-летнего цикла, уровень радиационного фона ГКЛ в максимуме предстоящего 25 цикла (с 2024 на 2025 гг.) должен быть не ниже уровня фонового излучения в максимуме 24 цикла (2014 г.). В этом случае, состояние неординарного сбоя 23-24-25 циклов изменится с локального на глобальный.

DOI: 10.31857/S0023420621020059

### ВВЕДЕНИЕ

Время от времени в литературе интенсивно обсуждается проблема: описывается ли поведение солнечной активности конечным и низко-размерным аттрактором, что указывало бы на регулярность процесса? В работе [1] утвердительного ответа на этот вопрос получено не было. Возможно, это связано с низкой информативностью чисел Вольфа. Так, в [2] было отмечено, что числа Вольфа (из-за специфического правила их подсчета) вряд ли могут быть гладкой функцией истинной динамической переменной. Правдоподобная оценка корреляционной (фрактальной) размерности, т.е. выход монотонной зависимости  $d(n) \sim n$  на плато при значении размерности  $d \approx 2.5-3$  в окрестности максимума и в начале ветви спада 11-летнего цикла, была получена нами [3, 4] по индексу мерцаний интенсивности галактических космических (ГКЛ). Ни по числам Вольфа, ни просто по интенсивности ГКЛ корректную оценку корреляционной размерности получить не удавалось.

Фаза смены знака общего магнитного поля Солнца (в окрестности максимума и в начале ветви спада 11-летнего цикла), как наиболее геоэффективная, представляет наибольший интерес в плане прогноза экстремальных проявлений Кос-

мической погоды. Геоэффективность фазы переполюсовки обусловлена тем, что в окрестности максимума и в начале ветви спада 11-летнего цикла регистрируется наибольшая спорадическая активность, сопровождаемая серией СМЕ и ударных волн. Повышение эффективности прогноза активной фазы 11-летнего солнечного цикла по космическим лучам является одной из целей данной работы. Выявление конечного и низко-размерного, т.е. частично-детерминированного процесса в вариациях индекса мерцаний ГКЛ является, очевидно, указанием на принципиальную возможность прогноза максимальной спорадической активности Солнца. Вывод о принципиальной возможности прогноза активной фазы солнечного цикла, сделанный нами исходя из полученной выше конечной и низкой величины корреляционной размерности, был достаточно подробно прокомментирован в соответствующем разделе монографии [5], посвященном теме фракталов в Космосе.

Ранее в [6], по космическим лучам был дан долгосрочный прогноз сбоя 11-летней цикличности Солнца, который в дальнейшем подтвердился: в настоящее время имеет место неординарный сбой 11-летней цикличности Солнца. При этом, важно определиться с характером текущего сбоя. В случае, если сбой окажется локальным как, на-

**Таблица 1.** Матрица корреляционных связей параметра флуктуаций ГКЛ с интенсивностью космических лучей, параметрами солнечного ветра и индексами солнечной активности: с интенсивностью ГКЛ  $R = 0.80$ ; с числами Вольфа  $R = -0.74$ ; с индексом “электрического поля солнечного ветра”  $R = -0.76$ . Наибольшее значение имеет антикорреляция параметра флуктуаций ГКЛ с  $Dst$ -вариацией  $R = -0.85$

	Параметр ГКЛ	Интенс. ГКЛ	Число больших магнитных бурь	Числа Вольфа (число пятен)	Индекс Мультиг. солн. магн. поля	Число больших событий электр. поля
Параметр ГКЛ	1	0.80	-0.85	-0.74	-0.77	-0.76
Интенс. ГКЛ	0.80	1	-0.89	-0.87	-0.68	-0.67
Число больших маг- нитных бурь	-0.85	-0.89	1	0.86	0.74	0.83
Числа Вольфа (число пятен)	-0.74	-0.87	0.86	1	0.83	0.59
Индекс Мультиг. солн. магн. поля	-0.77	-0.68	0.74	0.83	1	0.61
Число больших собы- тий электр. поля	-0.76	-0.67	0.83	0.59	0.61	1

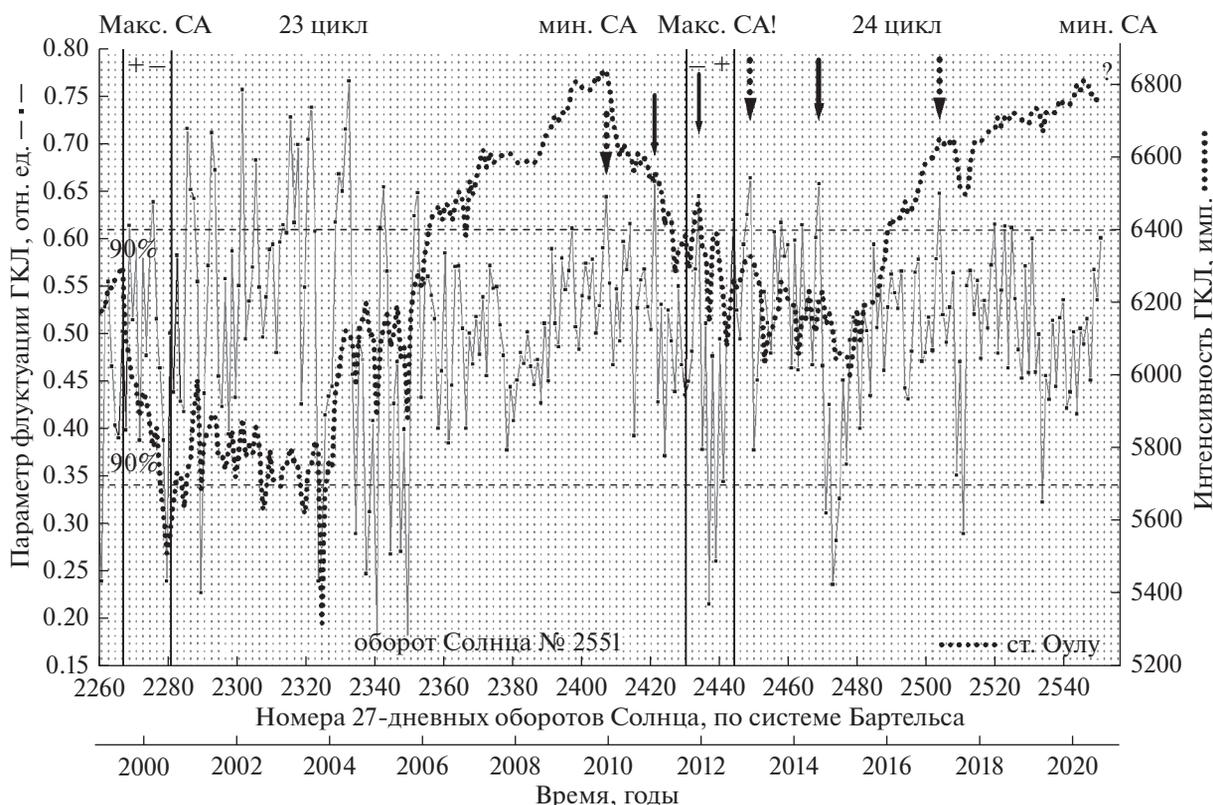
пример, это имело место (по нашим представлениям) в 19–20 циклах, то следует ожидать восстановления 11-летней цикличности в предстоящем 25 цикле. Это следует из гипотезы об инвариантности 22-летнего цикла [7]. Наиболее интересным, является вариант глобального сбоя 11-летней цикличности, т.е. случай нарушения инварианта 22-летнего цикла. Эта возможность и изучается в данной работе по результатам анализа динамики флуктуаций интенсивности ГКЛ за четыре последних цикла 21–24.

#### ВЕРОЯТНОСТНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА К АКТИВНОЙ ФАЗЕ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Выбор методологии изучения переходного режима к активной фазе солнечного цикла, когда велика вероятность серийных событий, определялся нижеследующими результатами. По часовым значениям интенсивности ГКЛ ст. Оулу (Финляндия) за 45 лет с 1968–2012 гг. определялось число событий (понижений интенсивности ГКЛ) фиксированной амплитуды. Так был выявлен степенной характер распределения числа событий в зависимости от их амплитуды [8]. Это согласуется с результатом, полученным ранее в [9], что подтверждается близостью степенных показателей  $\tau$ : “-1.60” для рентгеновских вспышек и “-1.56” в космических лучах. Данный результат находится в согласии с конечным и низким ( $d = 2.5-3$ ) значением корреляционной (фрактальной) размерности процесса на активной фазе солнечного цикла [4]. Действительно, правдоподобность полученной оценки степенного показателя  $\tau$  с очевидностью следует из аналитического выражения его связи с фрактальной размерностью:  $d = \tau + 1$ .

Сам факт существования обратной степенной зависимости с показателем степени  $\tau < 2$  указывает на то, что динамическая система находится в нетривиальном состоянии “самоорганизованной критичности”, когда весьма нерегулярно, т.е. катастрофически (что существенно осложняет прогноз) “сравливается” избыток запасенной в системе энергии. В результате, и математическое ожидание и дисперсия быстро и неограниченно увеличиваются по мере роста объема выборки, что дает характерный пример анти-интуитивного поведения масштабнo-инвариантных (фрактальных) систем [10–12]. Это указывает на то, что характер процесса явно не гауссов, допускающий корреляции на сколь угодно больших пространственно-временных масштабах. Как отмечается в [13], “Дальнейшие корреляционные эффекты проявляются в “странном” (негауссовом) поведении кинетических процессов ...” и, далее: “Можно сказать, что странность и фрактальность являются взаимно согласованными характеристиками одного и того же явления – самоорганизации системы к неравновесному турбулентному состоянию, динамика которого целиком подчиняется многомасштабным корреляционным взаимодействиям”. Следовательно, анализ “хвостов”, т.е. высших моментов функции распределения может оказаться достаточно информативным в задаче обнаружения переходного режима к условной “катастрофе”, в нашем случае, переходного режима к активной фазе солнечного цикла.

С другой стороны, из вероятностной теории разрушения сплошных сред и теории надежности известно, что обобщенная (3-х параметрическая, в общем случае) функция распределения Вейбулла–Гнеденко описывает выход системы на предельный критический режим перед кризисом или



**Рис. 1.** Результаты мониторинга космических лучей с 1999–2020 гг. Сплошная кривая – 27-дневные значения параметра флуктуаций ГКЛ в относительных единицах, шкала слева. Показан 90% уровень значимости. Пунктирная кривая – скорость счета космических лучей ст. Оулу (Финляндия) в импульсах за 5 мин, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца. Предвестники: начало 24 цикла показано точечной стрелкой, фаза роста – сплошная стрелка, фаза максимума 24 цикла – сплошная стрелка, завершение фазы инверсии поля – пунктирная стрелка, геоэффективная фаза начала ветви спада – сплошная стрелка. Низкие значения параметра флуктуаций в 2011–2012, в 2014–2015 и в 2017 гг. (заключены в овал) – означают диагностику активных фаз солнечного цикла.

условной “катастрофой” [14]. На языке этой вероятностной теории задача определения переходного режима сводится к задаче определения функции интенсивности отказов системы, выработавшей свои ресурсы. Максимум функции интенсивности отказов, или максимум функции Риска, есть, по сути – вероятность достижения критического значения анализируемой переменной, в данном случае, интенсивности космических лучей. Отношение плотности функции распределения Вейбулла–Гнеденко к “функции надежности” и есть искомая вероятность (функция Риска) или параметр флуктуаций космических лучей.

#### ПРОГНОЗ АКТИВНОЙ ФАЗЫ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ

Выше, на рис. 1 приведены результаты расчета параметра флуктуаций ГКЛ за период с 1999–2020 гг. (конечная, текущая дата: 6.IX.2020, оборот № 2551 по системе Бартельса). Для анализа вариаций параметра с периодами от одного года и менее, был исключен низкочастотный тренд, кото-

рый представляет собой, фактически, 11-летнюю вариацию. Предвестники активных фаз 24 цикла были зарегистрированы в нижеследующие моменты времени. Предвестник начала 24 цикла – на обороте 2407, первая точечная стрелка слева. Предвестник фазы роста – на обороте 2421, сплошная стрелка. Предвестник фазы максимума 24 цикла был зарегистрирован на обороте 2434, в январе 2012 (информация о прогнозе максимума 24 цикла была доложена на конференции ИКИ РАН, в феврале 2012 г.). Предвестник фазы инверсии магнитного поля зарегистрирован на обороте 2449 (точечная стрелка, рис. 1). Предвестник геоэффективной фазы начала ветви спада 11-летнего цикла (после завершения фазы реперолюсовки в конце 2013 г.) был зарегистрирован на обороте 2469, в июле 2014 – сплошная стрелка на том же рисунке.

Пунктирной стрелкой на рис. 1 представлен предвестник достаточно неожиданной активизации солнечной активности в окрестности фазы минимума текущего солнечного цикла 24 в июле–сентябре 2017 г. (обороты 2509–2511). Оче-

видно, что интервал времени, приходящийся в основном на обороты 2506–2508 (апрель–июнь 2017 г.) и представляет собой переходный режим к необычно активной фазе в окрестности минимума завершающегося 24 цикла. Действительно, в июле и сентябре 2017 г. были зарегистрированы большие (~7%) эффекты Форбуша и геомагнитные бури, которые и обусловили резкое и глубокое понижение в 27-дневных значениях интенсивности ГКЛ на оборотах 2509–2511 (рис. 1). Относительно небольшие вариации интенсивности ГКЛ в середине 2019 г. обусловлены прохождением орбиты Земли рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра из корональных дыр, что является обычным явлением для фазы минимума 11-летнего цикла.

Низкие значения параметра флуктуаций ГКЛ (заключенные в овал на рис. 1), регистрируемые после предвестников на фоне низких значений интенсивности космических лучей, означают диагностику прогнозируемых фаз солнечного цикла. В частности: фаза максимума спорадической активности (2011–2012 гг.), геоэффективная фаза начала ветви спада текущего цикла (с 2014 на 2015 гг.) и фаза весьма неожиданной активизации в окрестности минимума текущего 24 цикла (в июле–сентябре 2017 г.). Таким образом, введенный параметр флуктуаций космических лучей позволяет, в среднем, с заблаговременностью порядка ~1 оборота Солнца, дать среднесрочный прогноз активных фаз 11-летнего солнечного цикла (<http://www.forshock.ru/pred-long.html>).

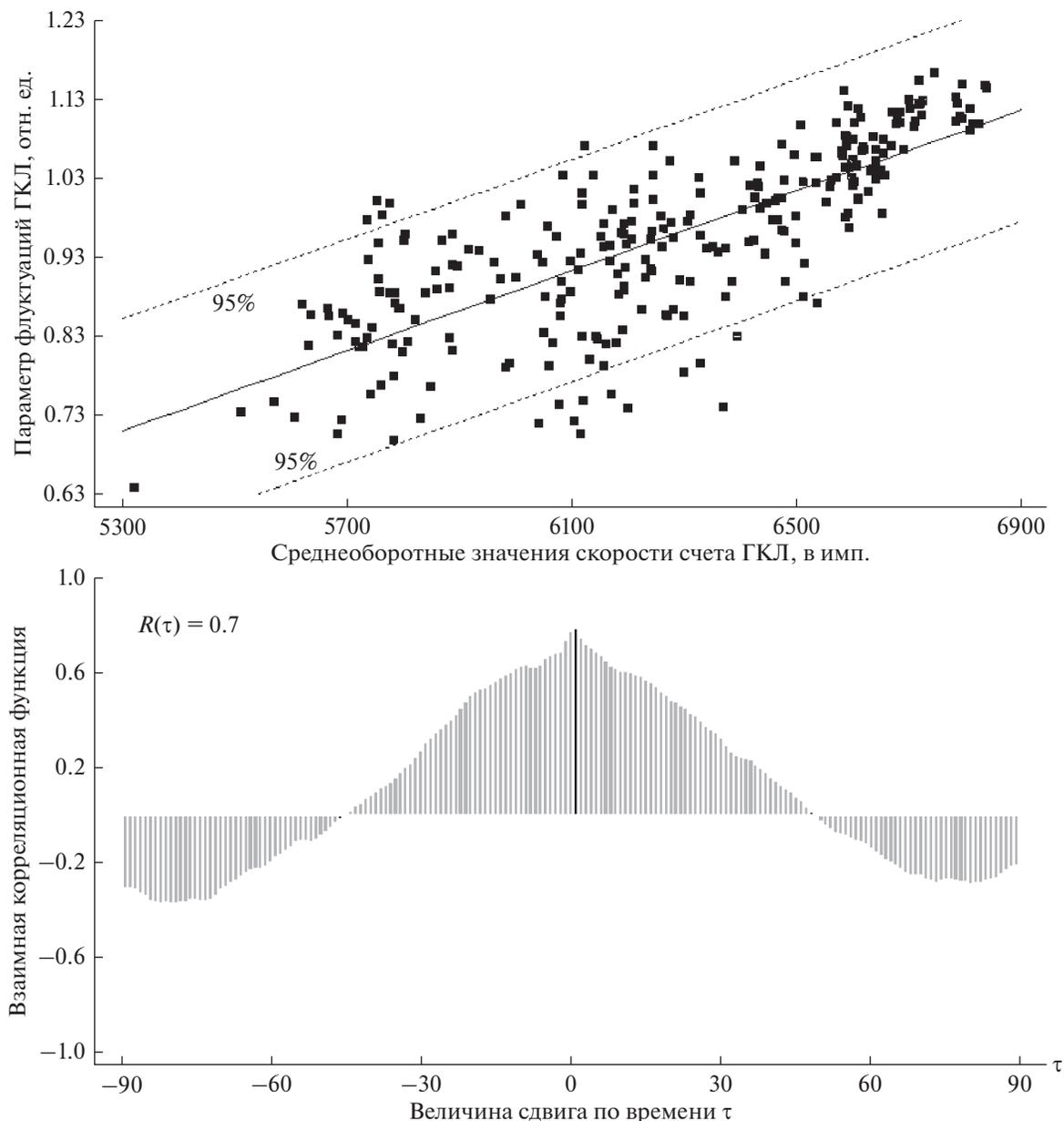
Это подтверждается оценкой взаимной корреляционной функции (ВКФ) 27-дневных значений введенного параметра флуктуаций и соответствующих значений интенсивности космических лучей (рис. 2): величина их взаимной корреляции  $R(\tau) \approx 0.7$ . При этом сдвиг максимума ВКФ, в среднем, на величину  $\tau \approx 1$  оборот Солнца указывает на систематическое опережение параметра флуктуаций соответствующих значений интенсивности ГКЛ. Это согласуется с нашим выводом о прогностических (и диагностических, тоже) возможностях введенного параметра флуктуаций ГКЛ.

Следует отметить, что моменты регистрации предвестников в космических лучах совпадают с началом перестроек магнитного поля в комплексах активности на Солнце. Это следовало из результатов сопоставления моментов регистрации предвестников (рис. 1) в космических лучах, с результатами наблюдений магнитного поля Солнца, представленных в работе [15]. Перестройки магнитного поля наблюдались на фазах роста и спада обоих максимумов (зарегистрированных в среднегодовых значениях чисел Вольфа в 2012 и 2014 гг.), т.е. на фазах их максимальной изменчивости.

Чтобы убедиться в том, что местоположение предвестников в космических лучах отражает реальную ситуацию в межпланетной среде, был проведен совместный анализ интенсивности космических лучей и параметров солнечного ветра: изменчивости или дисперсии межпланетного магнитного поля (ММП) и скорости солнечного ветра. Для анализа использовались результаты прямых измерений на американском космическом аппарате *ACE* (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/>). Действительно, на фазе роста и в окрестности максимума нового 24 цикла была выявлена годовая вариация скорости плазмы солнечного ветра и дисперсии ММП [7]. Это совпадает с годовой, в среднем, периодичностью регистрации предвестников, зарегистрированных нами в анализируемый период (рис. 1). Следовательно, можно сделать вывод, что предвестник в космических лучах является индикатором перестройки магнитного поля Солнца на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла. Это согласуется с современными данными и солнечных наблюдений: в работах [16, 17], отмечается квазипериодическая или “импульсная” структура фазы роста нового 24 цикла с тем же периодом ~1 год.

#### ИНВАРИАНТ “АМПЛИТУДА-ДЛИТЕЛЬНОСТЬ” 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА

Наибольшего размаха вариации среднеоборотных значений параметра флуктуаций ГКЛ достигают в окрестности максимума: на фазе переполусовки общего магнитного поля Солнца и на геоэффективной фазе начала ветви спада 11-летнего цикла (рис. 1). Ранее в [6], было установлено, что чем выше амплитуда цикла в максимуме, тем короче длительность процесса переполусовки (после завершения которой, начинается восстановление интенсивности ГКЛ). И, наоборот, чем ниже амплитуда цикла, тем продолжительнее фаза переполусовки. Действительно, длительность процесса инверсии поля для “низких” циклов (20 и 23), фактически, вдвое превышает таковую для более “высоких” циклов 21 и 22. Вывод об увеличении длительности солнечного цикла № 23, т.е. вывод о возможно предстоящем сбое 11-летней цикличности, был сделан в 2006 г. [6] по индексу мерцаний ГКЛ. Сейчас этот вывод подтвердился на новой базе, с использованием введенного параметра флуктуаций ГКЛ. Существенно, что сам факт увеличения длительности “низкого” по амплитуде 23 цикла является независимым экспериментальным свидетельством в пользу реальности инварианта 11-летнего цикла, его ожидаемого следствием. Полученные нами результаты согласуются с результатами работы [18], где также была установлена обратная зависимость между “временем между переполусовками и амплитудой цикла”. Указания на то, что “длина цикла, в свою



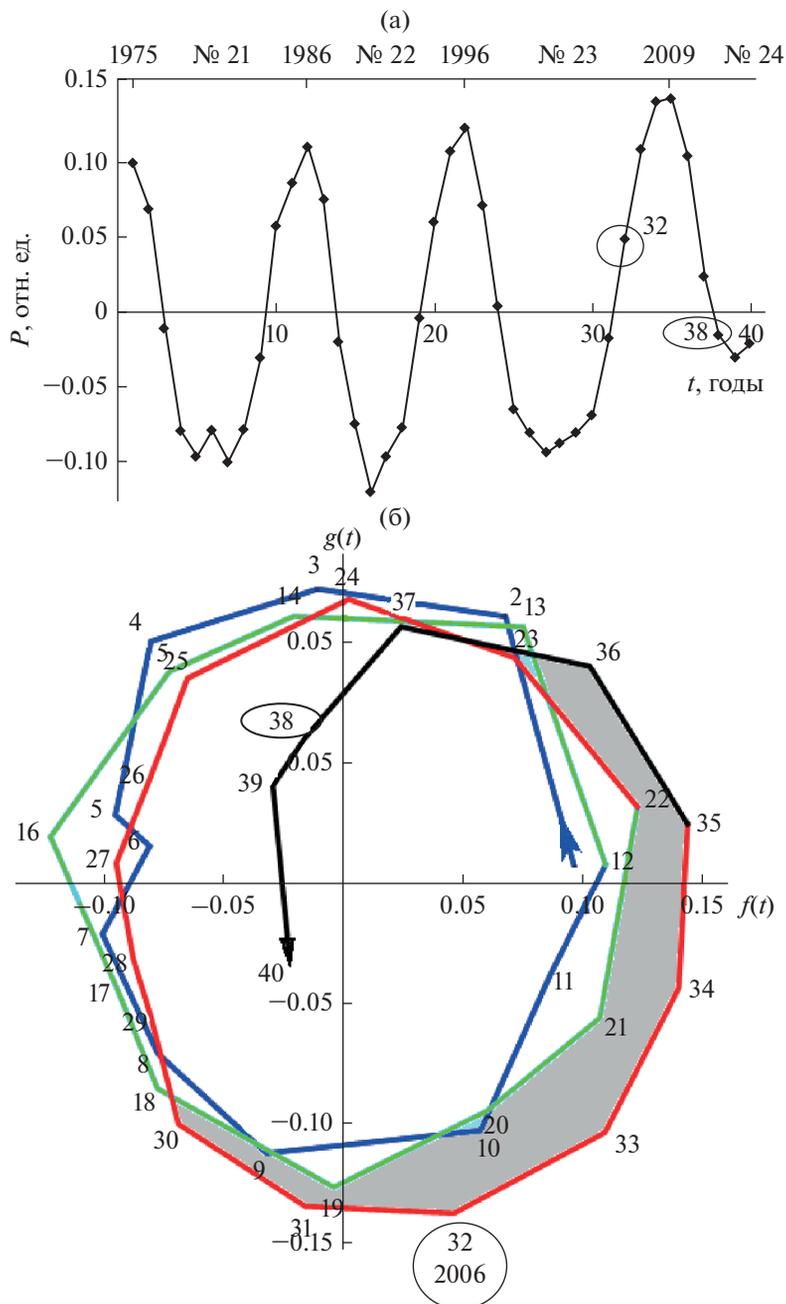
**Рис. 2.** Оценка связи 27-дневных значений параметра флуктуаций космических лучей и скорости счета космических лучей ст. Оулу в импульсах за 5 мин, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца: регрессионная статистическая связь установлена на уровне 95%, величина коэффициента их взаимной корреляции составляет величину  $R(\tau) \approx 0.7$ . Средняя величина заблаговременности предвестника в параметре флуктуаций ГКЛ относительно интенсивности космических лучей определяется величиной систематического сдвига по оси времени:  $\tau \approx 1$  оборот Солнца.

очередь, отрицательно коррелирует с высотой цикла” приведены и в недавней работе [19].

### ПРОГНОЗ АНОМАЛЬНОГО ПОВЫШЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Важно заметить, что гипотеза о наличии инварианта 11-летнего цикла “амплитуда-длительность” явилась логическим следствием целостного подхода к анализу вариаций солнечной актив-

ности. Дальнейшее развитие целостного подхода было естественно завершить анализом “фазовых портретов” солнечных циклов на комплексной фазовой плоскости. С этой целью, применим метод траекторного анализа колебаний на комплексной фазовой плоскости с использованием аналитического сигнала. Аналитический сигнал является математической моделью исходного сигнала. На комплексной плоскости он отображается вектором, модуль и фазовый угол которого изменя-

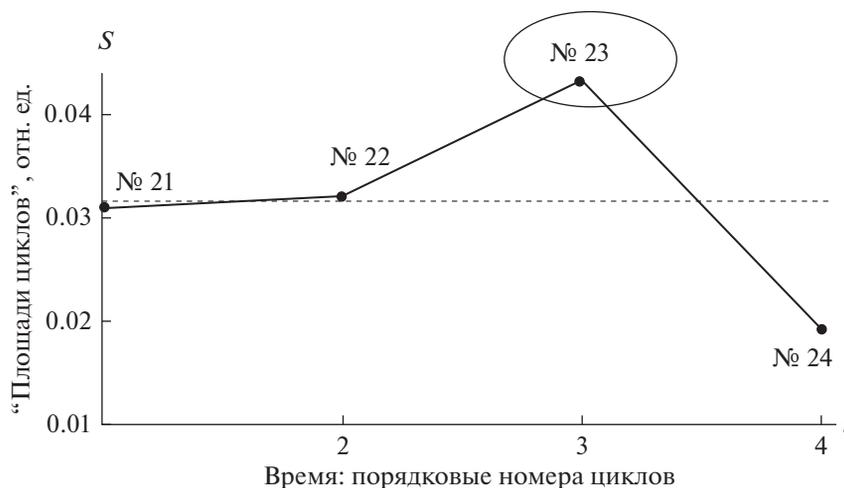


**Рис. 3.** “Фазовые портреты” последних 4-х неполных циклов № 21–24 (1975–2014 гг.), рассчитанные по среднегодовым значениям параметра флуктуаций ГКЛ. Вверху – временной ход параметра флуктуаций космических лучей. Показаны номера соответствующих циклов. Наибольшую площадь имеет 23 цикл.

ются от аргумента, а проекция сигнала на вещественную ось равна значению исходного сигнала.

“Фазовые портреты” 11-летней цикличности приведены на рис. 3. Они рассчитывались по среднегодовым значениям параметра флуктуаций ГКЛ. В верхней части рисунка, показан временной ход анализируемого параметра. На шкале времени приведены номера циклов. Наибольшую площадь, описывает траектория 23 цикла (увеличение площади показано штриховкой). Увеличе-

ние площади цикла начинается с 2006 г. (годовая точка на фазовой траектории № 32). Наибольшая площадь, замечаемая фазовой траекторией, считается признаком аномального цикла перед “фазовой катастрофой” [20], по сути – ее предвестником. В итоге, на языке “фазовых портретов” получено независимое подтверждение вывода о предвестнике в космических лучах сбоя 11-летней цикличности Солнца в современную эпоху – эпоху “Космической эры”.



**Рис. 4.** Оценка площадей заметаемых под кривыми 11-летних циклов 21–24 (1975–2014 гг.) по их “фазовым портретам”, рассчитанным по среднегодовым значениям параметра флуктуаций ГКЛ. Показаны номера циклов. Наибольшая площадь 23 цикла является предвестником неординарного сбоя 11-летней цикличности в 23–24 циклах.

В таком случае, сейчас мы, как минимум, находимся на стадии неординарного спада солнечной активности и, как максимум — в начальной фазе затяжного сбоя 11-летней цикличности Солнца, со всеми вытекающими отсюда последствиями. Прежде всего, имеется в виду ожидаемый аномально высокий, по сравнению с большинством циклов прошлого века, уровень интенсивности космических лучей в 2019–2021 гг. Впервые, подобный прогноз был дан по космическим лучам в 2006 г. [6]. Аномальное повышение радиационного фона тогда было зарегистрировано через год, в течение четырехлетнего периода 2007–2010 гг. В свою очередь, увеличение интенсивности ГКЛ способствует, как известно, усилению процесса облакообразования [21], интенсификации конвективных процессов в атмосфере, увеличению количества осадков и, как возможное следствие — понижению температуры в планетарном масштабе. В этом состоит альтернатива процессу глобального потепления, но все это будет иметь существенное значение лишь в случае глобального сбоя 11-летней цикличности, т.е. нарушения инварианта 22-летнего цикла.

#### ГЛОБАЛЬНЫЙ СБОЙ 11-ЛЕТНЕЙ ЦИКЛИЧНОСТИ СОЛНЦА КАК НАРУШЕНИЕ ИНВАРИАНТА 22-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА

Выше, было установлено, что увеличение площади “фазового портрета” солнечного цикла является предвестником сбоя 11-летней цикличности. Оценка площади заметаемой кривой солнечного цикла можно получить разными способами: по оценке площади заметаемой под кривой временного хода 11-летнего цикла и по оценке пло-

щади заметаемой фазовой траекторией на комплексной фазовой плоскости. Физический смысл термина “площади цикла” представляется более прозрачным во втором варианте (площадь, заметаемая фазовой траекторией на комплексной фазовой плоскости), нежели в первом. Площадь “фазового портрета” имеет размерность “фазового объема” (“действия”), с размерностью произведения “энергия · время”. В этом смысле, для фиксированного (во времени) цикла его площадь является характеристикой энергоемкости, изменение которой от цикла к циклу можно проследить, например, по изменению относительной вариации (<http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>) светимости Солнца в 11-летнем цикле.

Ниже приводится оценка площадей фазовых портретов солнечных циклов 21–24, т.е. характеристик их энергоемкости (по параметру флуктуаций ГКЛ). Площади циклов 21 и 22, практически, одинаковы (рис. 4). Неизменность площади фазового портрета солнечного цикла, как характеристики энергоемкости, указывает на консервативность системы в течение двух последовательных циклов 21 и 22. Консервативность, в указанном смысле, нарушается для двух последующих циклов 23 и 24. Нарушение консервативности системы означает наличие циклов с различной энергоемкостью (разными площадями). Это и наблюдается в циклах 23 и 24 (рис. 4): максимальная площадь приходится на 23 цикл, с последующим явным спадом площади “сбойного” 24 цикла (начиная с 2006 г.). Примечательно, что и относительная вариация светимости Солнца, как весьма очевидная характеристика энергоемкости цикла, начала уменьшаться также в 24 цикле, фактически, начиная с того же 2006 г.

Очевидно, что усреднение площадей пар соседних циклов сохраняет неизменность площадей пар 11-летних циклов: 21–22 и 23–24, т.е. неизменность площадей соседних 22-летних циклов или их энергоемкости. Это может означать консервативность системы (Солнца) в широком смысле, т.е. наличие инварианта с характерным масштабом длительности физического 22-летнего цикла. При условии сохранения указанного инварианта, после сбоя 11-летней цикличности в 23–24 циклах функционирование динамической системы (Солнца) в следующем 25 цикле (2021–2030 гг.) должно восстановиться! Это будет означать, что выполняется правило Гневывшева-Оля, согласно которому, амплитуда предстоящего нечетного 25 цикла должна быть больше амплитуды четного цикла 24. В случае космических лучей, выполнение правила Гневывшева-Оля соответствует выполнению следующего физического критерия: уровень радиационного фона ГКЛ в максимуме 25 цикла (с 2024 на 2025 гг.) должен быть значительно ниже уровня радиационного фона ГКЛ в максимуме 24 цикла (2014 г.). В таком случае, текущий неординарный сбой 23–24 циклов будет иметь статус “локального”, как и в случае локального (по нашим представлениям) сбоя, имевшего место, например, в циклах 19–20.

И только в случае нарушения инварианта с характерным масштабом 22-летнего цикла, т.е. нарушения консервативности в широком смысле, мы сталкиваемся с ситуацией глобального сбоя 11-летней цикличности или “фазовой катастрофы”. Примером тому, являются глобальные минимумы активности Солнца, известные как: минимум Маундера, минимум Дальтона и минимум Глайсберга. Нарушение инварианта физического 22-летнего цикла означает нарушение консервативности системы: уменьшение относительной вариации светимости Солнца в 25 цикле (в целом) подобно тому, что наблюдается сейчас в текущем 24 цикле.

Не восстановление 11-летней цикличности в 25 цикле будет означать нарушение правила Гневывшева-Оля, согласно которому, амплитуда предстоящего нечетного 25 цикла должна быть больше амплитуды четного цикла 24. В случае космических лучей, нарушение правила Гневывшева-Оля соответствует выполнению следующего физического критерия: уровень радиационного фона ГКЛ в максимуме предстоящего 25 цикла (с 2024 на 2025 гг.) должен быть выше (или равен), т.е. не ниже уровня радиационного фона в максимуме 24 цикла (2014 г.). В этом случае, статус неординарного сбоя 23–24–25 циклов сменится с локального на глобальный, со всеми вытекающими отсюда последствиями.

### АКТУАЛЬНОСТЬ СМЕНЫ ПАРАДИГМЫ “ЛИНЕЙНОЙ СУПЕРПОЗИЦИИ” ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЛН АКТИВНОСТИ СОЛНЦА

Нарушение инварианта физического 22-летнего цикла, т.е. реализация сценария глобального сбоя 11-летней цикличности (в случае не восстановления 11-летней цикличности в 25 цикле), могла бы означать реальность нелинейных режимов эволюции магнитного поля Солнца. Очевидно, что сбой 11-летней цикличности по сценарию “фазовой катастрофы”, отличается от известного сценария “линейной суперпозиции” периодических волн (11 лет и 200 лет и т.д.). В соответствии со сценарием “линейной суперпозиции”, наступление затяжного сбоя 11-летней цикличности ожидается лишь с середины 21 века.

Важно заметить, что реализация на Солнце не тривиального нелинейного режима “самоорганизованной критичности”, когда весьма нерегулярно, т.е. катастрофически стравливается избыток запасенной в системе энергии [22], лишает физических оснований идеологию “линейной суперпозиции волн” (11 и 200 лет) применительно к физике Солнца. В этом случае, становится очевидной причина запаздывания на полвека (!) неординарного сбоя в цикличности Солнца, прогноз которого сторонниками идеологии “линейной суперпозиции” был дан на середину 21 века. В реальности же, неординарный сбой 11-летней цикличности начался с 23 цикла, т.е. уже случился, притом, в начале 21 века, в соответствии с прогнозом, данным по космическим лучам в 2006 г. [6].

К настоящему времени, уже появились первые признаки нарушения инварианта 22-летнего цикла, т.е. первые признаки глобального сбоя 11-летней цикличности: в декабре 2019 г. превышен своеобразный рекорд эпохи “Космической эры” — числа “беспятенных” дней 2008 г. Сейчас, на очереди — “рекорд” на превышение уровня радиационного фона галактических космических лучей 2009 года (рис. 1). Оба указанных признака являются лишь необходимыми условиями глобального сбоя 11-летней цикличности: они относятся к фазе текущего минимума активности Солнца. Достаточным условием послужит выполнение следующего физического критерия: уровень радиационного фона ГКЛ в максимуме предстоящего 25 цикла (с 2024 на 2025 гг.) должен быть выше (или равен), т.е. не ниже уровня радиационного фона в максимуме 24 цикла (2014 г.). При выполнении указанных “необходимых и достаточных” физических критериев, статус неординарного сбоя 23–24–25 циклов сменится с локального на глобальный, со всеми вытекающими отсюда последствиями.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

1. По космическим лучам впервые был дан среднесрочный прогноз активных фаз 11-летнего цикла (<http://www.forshock.ru/predlong.html>) с заблаговременностью порядка  $\sim 1$  оборота Солнца. Это обусловлено тем, что предвестник в космических лучах является индикатором перестройки магнитного поля на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.

2. Обнаруженное по космическим лучам увеличение площади солнечного цикла 23 (<http://www.forshock.ru/predvlong.html>) явилось предвестником сбоя 11-летней цикличности: в соответствии с гипотезой автора об инварианте 22-летнего цикла, вслед за увеличением площади 23 цикла последовало уменьшение площади (энергоемкости) следующего 24 цикла. Уменьшение энергоемкости сопровождается уменьшением относительной вариации (<http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>) светимости Солнца, которая в 24-цикле уменьшилась до уровня среднего значения трех предыдущих циклов, т.е. практически вдвое. Дан прогноз многолетнего увеличения радиационного фона космических лучей в 2019–2021 гг.

3. В случае сохранения инварианта 22-летнего цикла, 11-летний цикл в 25-м цикле должен будет восстановиться. Это будет означать выполнение следующего физического критерия: уровень радиационного фона ГКЛ в максимуме 25 цикла (с 2024 на 2025 гг.) должен быть значимо ниже уровня радиационного фона ГКЛ в максимуме 24 цикла (2014 г.). В этом случае текущий неординарный сбой циклов 23–24–25 будет иметь статус локального.

4. В случае нарушения инварианта 22-летнего цикла, восстановления 11-летней цикличности в 25 цикле не произойдет. Это будет соответствовать выполнению следующего физического критерия: уровень радиационного фона ГКЛ в максимуме предстоящего 25 цикла (с 2024 на 2025 гг.) должен быть выше (или равен), т.е. не ниже уровня фонового излучения в максимуме 24 цикла (2014 г.). В этом случае, статус неординарного сбоя 23–24–25 циклов изменится с локального на глобальный, со всеми вытекающими отсюда последствиями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

И в заключение следует сказать, что многолетние исследования автора, по изучению переходных режимов солнечного ветра (различных масштабов) к активной фазе солнечного цикла, нашли свое отражение в итоговой монографии по Космической погоде [23]. Указанная монография вышла в издательстве Elsevier в США, написанная коллективом известных российских и зару-

бежных авторов: “Несколько лет назад было достоверно установлено, что параметр флуктуаций ГКЛ может быть использован как индикатор фазы роста солнечной активности в 11-летнем цикле [24]. По данным долговременных наблюдений за флуктуациями ГКЛ, эти авторы, по сути, предсказали сбой фазы солнечной активности в 24 цикле. Развивая этот подход, авторы [7] не исключают так называемую “фазовую катастрофу” в цикле 25 (2020–2030 гг.), аналогичной эпохе глобального минимума Дальтона. Это предупреждение, на наш взгляд, заслуживает внимания”.

В заключение автор выражает глубокую благодарность Вячеславу Валерьевичу Козлову за разработку, создание и программное сопровождение роботизированной экспертной системы прогноза и диагностики геоэффективных событий Космической погоды в режиме реального времени Cyber-FORSHOCK (<http://www.forshock.ru/pred.html>), по 5-мин данным Европейской БД космических лучей.

Автор выражает также искреннюю признательность и благодарность Илье Усоскину, Университет г. Оулу, геофизическая обсерватория Соданкила (Финляндия, <http://cosmicrays oulu.fi/>) за любезно предоставленные кондиционные 5-мин данные измерений нейтронного монитора ст. Оулу за длительный период времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carbonel M., Oliver L., Ballester J.L. A Search for Chaotic Behavior in Solar Activity // *Astronomy and Astrophys.* 1994. V. 290. № 3. P. 983–994.
2. Михайлуца В.П., Фатьянов М.П. Размерность и структура солнечного аттрактора по значениям энергии магнитного поля Солнца в 21 цикле // *Солнечные данные.* 1989. № 11. С. 109–116.
3. Козлов В.И. Масштабная инвариантность динамики флуктуаций космических лучей на геоэффективных фазах солнечного цикла // *Геомагнетизм и аэронаука.* 1999. Т. 39. № 1. С. 95–99.
4. Козлов В.И. Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // *Геомагнетизм и аэронаука.* 1999. Т. 39. № 1. С. 100–104.
5. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М. МГУ: ЛОГОС, 2005.
6. Козлов В.И., Марков В.В. Вейвлет-образ тонкой структуры 11-летнего цикла по исследованию флуктуаций космических лучей в 20–23 циклах // *Геомагнетизм и аэронаука.* 2007. Т. 47. № 1. С. 47–55.
7. Козлов В.И., Козлов В.В. АРИТМИЯ СОЛНЦА. В космических лучах. Якутск: ФГБУН ИМЗ СО РАН. ИКФИА СО РАН, 2016.
8. Козлов В.И. Основания прогноза активности Солнца на базе мониторинга космических лучей // *ВЕСТНИК СВФУ.* № 6(68). 2018. Якутск. СВФУ-ИКФИА. С. 68–80.

9. *Dennis B.R.* Solar hard X-ray bursts // *Solar Physics*. 1985. V. 100. P. 465–490.
10. *Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.* Self-organized criticality // *Phys. Rev.* 1988. V. 38. № 1. P. 364–374.
11. *Bak P.* HOW NATURE WORKS. The science of self-organized criticality. Springer-Verlag, New York, Inc. 1996.
12. *Подлазов А.В., Осокин А.Р.* Самоорганизованная критичность эруптивных процессов в солнечной плазме // *Мат. моделирование*. 2002. Т. 14. № 2. 118–126.
13. *Зеленый Л.М., Милованов А.В.* Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики // *УФН*. 2004. Т. 174. № 8. С. 809–852.
14. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин И.Д.* Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983.
15. *Язев С.А.* Комплексы активности на Солнце в 23 цикле активности // *Солнечно-земная физика*. Иркутск. 2010. Вып. 16. С. 94–101.
16. *Мордвинов А.В., Язев С.А., Лхагважав Ч., Батмунх Д.* Комплексы активности и структура крупномасштабного магнитного поля Солнца в цикле 24 // *Современная геодинамика и опасные природные процессы в центральной Азии*. Иркутск. 2011. Вып. 7. С. 10–15.
17. *Мордвинов А.В., Головка А.А., Язев С.А.* Комплексы активности и инверсия магнитного поля на полюсах Солнца в текущем цикле // *Солнечно-земная физика*. Иркутск. 2014. Вып. 25. С. 3–9.
18. *Тлатов А.Г.* Трехкратная переполусовка крупномасштабного магнитного поля Солнца в 24-м цикле активности и прогноз амплитуды 25-го цикла активности // Тезисы доклада на 9-й ежегодной конференции ИКИ “ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ”. 10–14 февраля 2014. С. 4.
19. *Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д.* Об отрицательной корреляции между солнечной активностью и скоростью вращения Солнца // *Письма в Астрономический журнал*. 2016. Т. 42. № 9. С. 694–700.
20. *Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В.* Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986.
21. *Крымский Г.Ф.* Космические лучи и околоземное пространство // *Солнечно-земная физика*. ИСЗФ СО РАН. Иркутск. 2002. Вып. 2. № 115. С. 42–45.
22. *Козлов В.И., Козлов В.В.* АРИТМИЯ СОЛНЦА. В космических лучах. Якутск: ФГБУН ИМЗ СО РАН. ИКФИА СО РАН, 2018.
23. *Panasyuk M., Kalegaev V., Miroshnichenko L. et al.* EXTREME SOLAR & GEOMAGNETIC CONDITIONS. Extreme Events in Geospace: origins, predictability, and consequences. Isevier, 2017. P. 358. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812700-1.00013-3>
24. *Kozlov V.I., Kozlov V.V.* Cosmic ray fluctuation parameter as indicator of 11-year cycle activity growth phase // *J. Phys. Conf. Ser.* 2013. V. 409. P. 012160. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012160>

УДК 523.9-1/-8,520.8

## РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА РЕКОНСТРУКЦИИ ГАВАНСКОЙ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ В СОСТАВЕ РОССИЙСКИХ СЛУЖБ СОЛНЦА И КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

© 2021 г. В. М. Богод<sup>1</sup>, \*, А. А. Стороженко<sup>1</sup>, А. Г. Тлатов<sup>2</sup>, К. М. Кузанын<sup>3</sup>, А. А. Абунин<sup>3</sup>,  
С. В. Лесовой<sup>4</sup>, Omar Pons<sup>5</sup>, Marta Uratsuka<sup>5</sup>, Ramses Zaldívar<sup>5</sup>, Sierra Pablo<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

<sup>2</sup>Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия

<sup>3</sup>Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт солнечно-земной физики РАН, Иркутск, Россия

<sup>5</sup>Институт геофизики и астрономии Кубы, Гавана, Куба

\*vbog\_spb@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2020 г.

После доработки 30.04.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

Необходимость воссоздания Гаванской наблюдательной солнечной станции сегодня диктуется важностью получения регулярного прогноза активности Солнца в широком диапазоне временных интервалов. Подробно описана концепция создаваемой наблюдательной сети, инфраструктура патрульной станции как элемента сети. Функции этой сети предоставят непрерывный наблюдательный материал для Российских служб Солнца и Космической Погоды и будут независимы от космических наблюдений, но способны использовать их для контроля качества. Рассмотрены физические основы комплексных наблюдений для широкого круга гелиогеофизических явлений.

DOI: 10.31857/S0023420621020023

### 1. ВВЕДЕНИЕ

11.IX.2019 г. исполнилось 50 лет Гаванской радиоастрономической станции, возникшей после проведения наблюдения затмения Солнца советской экспедицией. Станция проводила регулярные наблюдения Солнца до 2006 г., с точностью измерения полного потока радиоизлучения до 2%.

В силу удачного географического положение Кубы восстановление радионаблюдений Солнца увеличит долготное перекрытие по времени и будет полезно как для службы Солнца России, так и для службы Космической погоды, где важна информация об уровне его активности.

В 2018 г. в РФФИ были объявлены совместные Российско-кубинские гранты и начата совместная деятельность по реновации кубинской станции.

### 2. ЦЕЛЬ ПРОЕКТА

Для ознакомления с состоянием станции были проведены экспедиции, в результате которых было принято решение о создании станции нового типа, в которой был бы реализован полностью автоматизированный режим наблюдений. Эти идеи также направлены на воссоздание Российской

службы Солнца с использованием большой долготной протяженности России на базе сети наземных станций, в которую будет включена и патрульная станция в Гаване. Логика регулярных наземных наблюдений активности Солнца с помощью многодиапазонной аппаратуры, приводит к необходимости безостановочных наблюдений. Широкое долготное перекрытие в России позволяет перекрыть основную часть времени суток для непрерывных наблюдений Солнца. Для этого нужно разместить ряд патрульных станций по долготе от Владивостока (Горнотаежная) до Калининграда, а также патрульную станцию на Кубе (регулярные наблюдения на которой сейчас остановлены).

Ключевым элементом этой сети является автоматическая Солнечная патрульная станция, построенная на основе универсального проекта с широким применением последних достижений в области астроприборостроения и современных цифровых технологий. Это позволит реализовать полностью автоматизированный процесс наблюдений, в удаленном доступе и в безоператорном режиме даже без использования зарубежных спутниковых данных. По нашим оценкам, для такой задачи достаточно 8–10 однотипных патруль-

**Таблица 1.** Возможные местоположения сети Солнечных патрульных станций

Расположение патрульной станции	Долгота, $L$	Часовой пояс, $P$	Долготное перекрытие, в UT $\Delta(L_{max}-L_{min})$
Камчатка	+160°	+12	(-4)-(+8)
*Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН	+132°	+9	(+5)-(+13)
*Иркутск, ИСЗФ	+104.8°	+7	(+3)-(+11)
*Коуровская обсерватория, УрФУ	+59.5°	+5	(+1)-(+9)
*Кисловодск, ГАС	+42.3°	+4	(0)-(+8)
*ИЗМИРАН	+37.3°	+3	(-1)-(+7)
*КрАО	+34°	+3	(-1)-(+7)
Калининград, ИЗМИРАН	+20.4°	+2	(-2)-(+6)
Тенериф, обс. МГУ	-16.3°	0	(-3)-(+4)
*Куба, Гавана	-82.5°	-4	(-7)-(0)
Мексика, Baja California	-110°	-7	(-10)-(-4)

\* Обсерватории России и Кубы.

ных станций, размещение которых приведено в табл. 1.

В оснащение этих наблюдательных станций должны входить автоматические патрульные оптические и радиотелескопы. Прототипы таких телескопов созданы и уже работают в синоптическом режиме наблюдений на ГАС ГАО. В нашем проекте РФФИ № 18-52-34004 отрабатывается стратегия и методы работы сети патрульных телескопов.

Особо следует отметить важность использования наблюдений в радиодиапазоне на волне 10.7 см. Индекс потока излучения на этой волне давно стал хорошей заменой знаменитому индексу чисел Вольфа, который подвержен погодным аномалиям. Оригинальные наблюдения проводятся в Канаде [1, 2], где они проводятся 1 раз в сутки по четко отработанной методике. Сейчас данные этого индекса имеют высокий спрос для задач связанные с возмущениями в земной атмосфере (например, широкое использование для прогноза состояния земной ионосферы, полярной шапки, и для ряда задач службы Космическая Погода). Непрерывные спектральные измерения с центром на волне 10.7 см, предполагаемые в наших методиках, значительно повысят точность прогнозов.

Следует отметить, что регулярные данные сети на базе наземных круглосуточных наблюдений будут способствовать решению многих вопросов и Российской Службы Космической Погоды, связанных с механизмами воздействия солнечной активности на состояние магнитосферы, ионосферы и атмосферы Земли, посредством трех агентов – электромагнитного излучения, потоков релятивистских частиц и высокоскоростных потоков солнечной плазмы.

(а) **Электромагнитное излучение.** Основные геоэффективные проявления электромагнитного излучения Солнца наблюдаются во время сильных солнечных вспышек – быстрых, мощных выделений энергии, когда может значительно повышаться уровень излучения на частотах от радио до гамма диапазона. Время распространения возмущения от Солнца до орбиты Земли ~8 мин. Вспышки возникают в активных областях со сложной вертикальной структурой магнитных полей, перезамыкания в которых приводят к резкому преобразованию магнитной энергии в кинетическую энергию высокоскоростных энергичных частиц (электроны, протоны и ионы).

Основные механизмы воздействия электромагнитного излучения солнечных вспышек на околоземное пространство, вызывающие негативные последствия:

- изменение состояния ионосферы вследствие ионизации частиц ультрафиолетовым и рентгеновским излучением, что может приводить к перебоям в системах связи, использующих ионосферу как отражающий слой или как среду распространения радиоволн;
- нагрев верхних слоев атмосферы ультрафиолетовым излучением, что приводит к расширению атмосферы и, как следствие, к более сильному аэродинамическому торможению космических аппаратов, находящихся на низких орбитах;
- увеличение электромагнитного излучения Солнца в микроволновом и радиодиапазонах, что может создавать помехи радарам, системам навигации и связи.

(б) **Релятивистские частицы.** Потоки солнечных энергетических частиц (SEPs) представляют собой потоки протонов, ядер, электронов и даже нейтронов, ускоренных до релятивистских ско-

ростей. Точный механизм ускорения до сих пор остается до конца не выясненным. Предположительно, ускорение этих частиц происходит как в момент вспышки в петле, так и на ударной волне, создаваемой соответствующим корональным выбросом массы. Рассматриваемые частицы опасны как для незащищенных космонавтов, так и бортовой электроники КА. Время распространения ускоренных частиц от Солнца до орбиты Земли всего десятки минут, а регистрироваться поток на высоком (опасном) уровне может несколько дней после начала события.

(в) **Потоки солнечной плазмы.** Основным фактором, влияющим на состояние космической погоды, являются потоки плазмы, испускаемые Солнцем. Существуют два основных типа возмущений межпланетной среды: спорадические и рекуррентные. Первые обусловлены корональными выбросами массы (КВМ), вторые – высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр, вращающимися вместе с Солнцем. Оба типа межпланетных возмущений способны вызвать достаточно серьезный отклик в магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли.

К наиболее сильным возмущениям космической погоды приводят КВМ, представляющие собой облака плазмы, выбрасываемые с поверхности Солнца в межпланетное пространство со скоростью до 3000 км/с и более. КВМ возникают в межпланетной структуре активной области над линиями раздела полярностей магнитного поля (в виде волокон) на уровне переходной зоны хромосферы-корона, к которым чувствительно радиоизлучение в диапазоне длин волн  $10.7 \text{ см} \pm 20\%$  как в интенсивности, так и в круговой поляризации. Вспышечно-активные области генерируют КВМ в периоды генерации вспышек и часто сопровождают друг друга.

Во время таких событий могут генерироваться заряженные частицы, которые создают дополнительные зоны рассеяния электромагнитных волн радио- и микроволнового диапазонов, приводя к сбоям в работе спутников связи и систем навигации. Заряды, накопленные на обшивках КА, могут приводить к возникновению разрядов внутри электронных схем. Дополнительные токи в ионосфере, возникающие во время магнитных бурь, создают наведенные геомагнитные токи на поверхности Земли.

Т.о., перечисленные выше агенты практически полностью определяют состояние космической погоды. Важно отметить, что большинство существующих моделей, описывающих состояние околоземной среды (ионосферы, атмосферы и т.д.), в качестве одного из основных входных параметров используют индекс, характеризующий непосредственно солнечную активность, точнее – поток радиоизлучения Солнца на длине

волны 10.7 см (индекс *F10.7*). Более того, непрерывная регистрация радиоизлучения на волне 10.7 см с анализом тонкой структуры спектра вблизи этой частоты в данном проекте дает возможность для ранней регистрации вспышечной активности и выбросов КВМ.

На данный момент информация об индексе *F10.7* берется, в основном, с зарубежных источников информации. Важно подчеркнуть, что наблюдались случаи, когда доступ к этим данным временно ограничивался по неизвестным причинам.

Таким образом, с целью обеспечения непрерывности анализа и прогнозирования состояния околоземной среды, а также повышения оборонной способности страны необходимо возродить Службу Солнца. И на первом этапе важно развернуть сеть наблюдательных станций в нашей стране.

### 3. КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПАТРУЛЬНОЙ СТАНЦИИ

Предполагается реализация полностью автоматического режима работы станции с удаленным управлением и контролем. В состав станции включаются радиотелескопы на сантиметровый (СМВ), дециметровый (ДМВ) и метровый (МВ) диапазоны и оптический телескоп СПОТ (прототип существует в ГАС ГАО). В службе Солнца используются: радиоспектрограф СМ диапазона [3–15 см] для оценки корональных магнитных полей, радиометр на диапазон 10.7 см для дублирования службы чисел Вольфа; радиоспектрограф МВ диапазона для оценки шумовых бурь (ШБ) и КВМ; оптический телескоп СПОТ для измерения активности в линиях Ca ПК, H-альфа, He10830, для получения магнитограмм диска Солнца, КВМ и жесткого излучения.

Инженерное оборудование и автоматизированный комплекс Солнечной станции должно обеспечивать следующие основные функции:

- управление процессом наблюдений в автоматическом режиме, в соответствии с программой наблюдений;
- возможность удаленного мониторинга состояния основных узлов станции;
- возможность удаленного управления узлами станции в ручном и автоматизированном режиме;
- визуальный контроль внутреннего пространства станции;
- автоматическую противопожарную защиту и сигнализацию;
- контроль доступа обслуживающего персонала к узлам станции;
- возможность работы в автономном режиме не зависимо от внешних источников электропитания, с заданным запасом автономности;

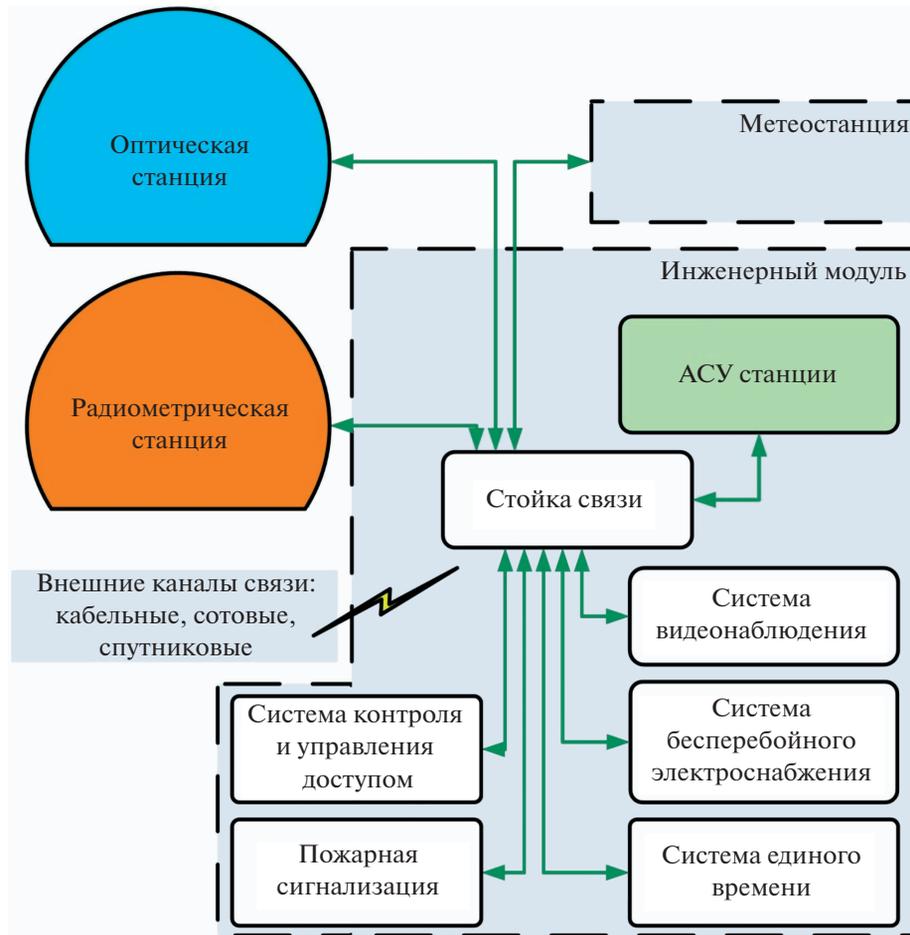


Рис. 1. Структурная схема автоматической Солнечной патрульной станции.

- контроль основных метеорологических параметров в месте установки станции;
- информационные коммуникации с применением современных цифровых каналов связи, передачу результатов наблюдений, временных трендов технологических параметров на удаленные сервера авторизованных центров обработки информации;
- локальный архив результатов наблюдений и временных трендов технологических параметров станции.

На рис. 1 приведена схема типовой автоматизированной наземной станции.

Таким образом, будет создана Сеть круглосуточных астрономических наземных наблюдений активности Солнца (СКАННАС) в составе 10 патрульных станций для обеспечения задач Российской службы Солнца и Космической Погоды (см. табл. 1).

#### 4. СЕТЬ КРУГЛОСУТОЧНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА (СКАННАС)

Сеть патрульных станций включает в себя также центры обработки данных, в автоматическом режиме должна обеспечивать:

- оперативную информацию о солнечной активности в непрерывном режиме;
- составление on-line моделей для анализа данных наблюдений;
- длительные однородные ряды наблюдений;
- выработку оперативного прогноза состояния космической погоды.

Наблюдательная сеть должна способствовать решению задач представляющих научный интерес, а также имеет широкое прикладное значение:

- прогноз и круглосуточный мониторинг солнечных вспышек по оптическим и радиоданным;
- прогноз и круглосуточный мониторинг корональных выбросов массы по оптическим и радиоданным;

**Таблица 2.** Значения корреляции фоновых потоков микроволнового излучения для волн 10.7, 5 и 3 см с индексами активности: числа пятен SN, площади пятен SA и фонового рентгеновского излучения X-Ray

Индекс\λ	10.7	5	3
SN (Sunspot Number)	0.881	0.812	0.55
SA (Sunspot Area)	0.857	0.873	0.659
X-Ray background	0.872	0.879	0.681

- прогноз космической погоды на орбите Земли в солнечной гелиосфере;
- прогноз воздействия солнечных событий и жесткого излучения на магнитосферу и верхние слои атмосферы;
- продолжение длительных однородных рядов наблюдений солнечной активности (проблема “Космический климат”).

Расположение наблюдательных пунктов должно обеспечивать максимально возможное перекрытие суточного интервала наблюдений, табл. 1. С учетом Камчатки и Мексики долготное перекрытие  $\Delta(L_{\max} - L_{\min})$  составляет 19 ч, с учетом длительности наблюдений  $D = 8-10$  ч, суточный интервал наблюдений может быть перекрыт полностью.

## 5. ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА СКАННАС

Оптические наблюдения на СКАННАС необходимы для наблюдения фотосферы, хромосферы и короны Солнца, в которых формируются и транспортируются многие явления КП. Их оперативное прогнозирование является необходимым условием для успешного осуществления космических программ, авиасообщения на высоких широтах и других задач, в том числе и задач специального назначения. Здесь, мы представляем комплекс, состоящий из наземных оптических телескопов, математических моделей и аппаратно-программных средств. Этот комплекс осуществляет решение следующих задач:

- Прогнозирование параметров солнечного ветра (СВ) в гелиосфере и вблизи Земли в частности. Реконструкции параметров солнечного ветра производится по данным наблюдений магнитографа СТОП, моделирования и реконструкции параметров СВ на основе модели Wang-Sheley-Argе [3, 4] и баллистической модели распространения потоков солнечного ветра от поверхности источников. В этой модели считается, что на расстояниях до поверхности источника  $R_s (R_s \sim 2.5R_{\odot})$ , где  $R_{\odot}$  – радиус Солнца, скорость солнечного ветра определяется фактором расширения магнитного поля. Выше  $R_s$ , солнечный ветер распространяется

радиально. При этом быстрые и медленные потоки могут взаимодействовать между собой. Результаты прогнозирования ежедневно представлены на сайте <http://solarstation.ru/sun-service/forecast>.

- Детектирование и расчет геоэффективности корональных выбросов массы (КВМ). Параметры КВМ, а именно вектор скорости и оценка плотности на начальном этапе распространения определяются по данным патрульных телескопов. В дальнейшем распространение КВМ через гелиосферу определяется на основе модели, основанной на взаимодействии КВМ с солнечным ветром через аэродинамическое сопротивление. В этой модели мы рассматриваем КВМ в виде облака, представленного набором точек, и отслеживаем траекторию движения каждой точки в гелиосфере, вплоть до орбиты Земли.

- Прогноз солнечных вспышек на основе ежедневных синоптических наблюдений солнечной активности в оптическом и радиодиапазоне. Многофакторная модель построена на основе машинного обучения. Модель позволяет осуществлять прогноз количества и мощность солнечных вспышек за один-два дня с высокой достоверностью.

- Прогноз фонового потока жесткого излучения по данным наземных наблюдений солнечной активности на основе моделирования нейронных сетей.

- Оптические телескопы с непрерывным режимом наблюдений, позволяют наблюдать в центре и крыльях спектральных линий. Основное назначение таких телескопов регистрация КВМ и солнечных вспышек. Телескопы магнитографы с высокой чувствительностью магнитного поля предназначены для реконструкции источников высокоскоростного солнечного ветра.

## 6. НАБЛЮДЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА СКАННАС

История исследования активности Солнца указывает на тесную связь чисел солнечных пятен (индекс Вольфа) с потоком радиоизлучения на волне 10.7 см (индекс  $F10.7$ ). Микроволновое излучение в широком диапазоне от 3 до 30 см является хорошим показателем общей солнечной активности. Этот индекс имеет длинную серию наблюдений, начатую Ковингтоном [5] в Канаде в 1947 г. В отличие от индекса Вольфа, точность которого во многом определяется процедурой подсчета солнечных пятен, индекс  $F10.7$  отражает физические процессы в активной солнечной короне.

В проекте уделено особое внимание регулярной регистрации индекса  $F10.7$  и спектральным изменениям потока радиоизлучения со сдвигами на коротковолновую и длинноволновую части спектра. Подробное изучение спектральных особенностей вспышечно-продуктивных активных

областей (ВПАО) [6] на крупном радиотелескопе РАТАН-600 показало, что в ВПАО со сложной структурой крупных пятен возникает микроволновое поляризованное радиоизлучение в широком диапазоне радиоволн, обусловленное различными механизмами. К ним относятся: циклотронное излучение над пятнами с круговой поляризацией на низких гармониках гирочастоты, доминирующее на волнах от 1.6 до 10 см [7, 8]; межпятенное слабополяризованное излучение, доминирующее в диапазоне волн от 8 до 12 см, которое обусловлено несколькими механизмами излучения (циклотронным излучением в поперечном магнитном поле [9], нетепловым излучением источника над нейтральной линией магнитного поля (NLS), [7, 9, 10], либо излучением плотного продольного токового слоя [11]). Также присутствует излучение широкого бесструктурного Гало в диапазоне от 12 до 30 см, предположительно нетепловой природы [12–15]. Многочисленные спектральные наблюдения активных областей на Солнце с помощью крупных инструментов РАТАН-600, VLA [10], OWSA [16] и некоторых других, указывают на четкую связь поведения спектра потока радиоизлучения с различным состоянием активной области:

А) В стабильном состоянии в спектре активной области на коротких волнах наблюдается рост потока радиоизлучения с длиной волны, связанный с перемещением по высоте 3-й и 2-й гирогармоник в область корональных температур. 3-я гармоника с оптической толщиной ( $>1$ ) располагается выше 2-й гармоники (также плотной). В срединном диапазоне наблюдается стабильное яркое межпятенное излучение. На более длинных волнах в дециметровом диапазоне спектр потока спадает ввиду перехода в более высокие слои оптически тонкой короны с формированием широкого бесструктурного Гало нетепловой природы [17].

В) В предвспышечном состоянии ВПАО возникает резкий рост потока радиоизлучения на коротких волнах, который обычно связан с выходом нового магнитного потока. Именно в предвспышечной фазе происходят процессы накопления энергии, процессы формирования предвспышечных состояний (токовые слои, пекулярные источники, аномалии в поляризованном радиоизлучении и др.) [18]. Рост спектра на коротких волнах используется в качестве критерия вспышечного прогноза в интервале до 3 сут [18] с достоверностью около до 80%. В срединном диапазоне наблюдается стабильное увеличение межпятенного излучения за двое суток до мощной вспышки [19]. В длинноволновом диапазоне заметных изменений в этом состоянии не происходит.

В ходе вспышечного процесса в ВПАО наблюдаются значительные изменения в спектре пото-

ка радиоизлучения во всем спектре от 1.6 до 30 см с резкими изменениями по времени, частоте и поляризации и возникновением многочисленных микровсплесков в длинноволновом диапазоне [20, 21].

С) Поствспышечное излучение часто обусловлено возникновением яркой пост-эруптивной аркады в виде длительно живущего оптически тонкого радиоисточника [22]. При наличии условий для повторных вспышечных процессов сохраняется подъем в коротковолновой части спектра.

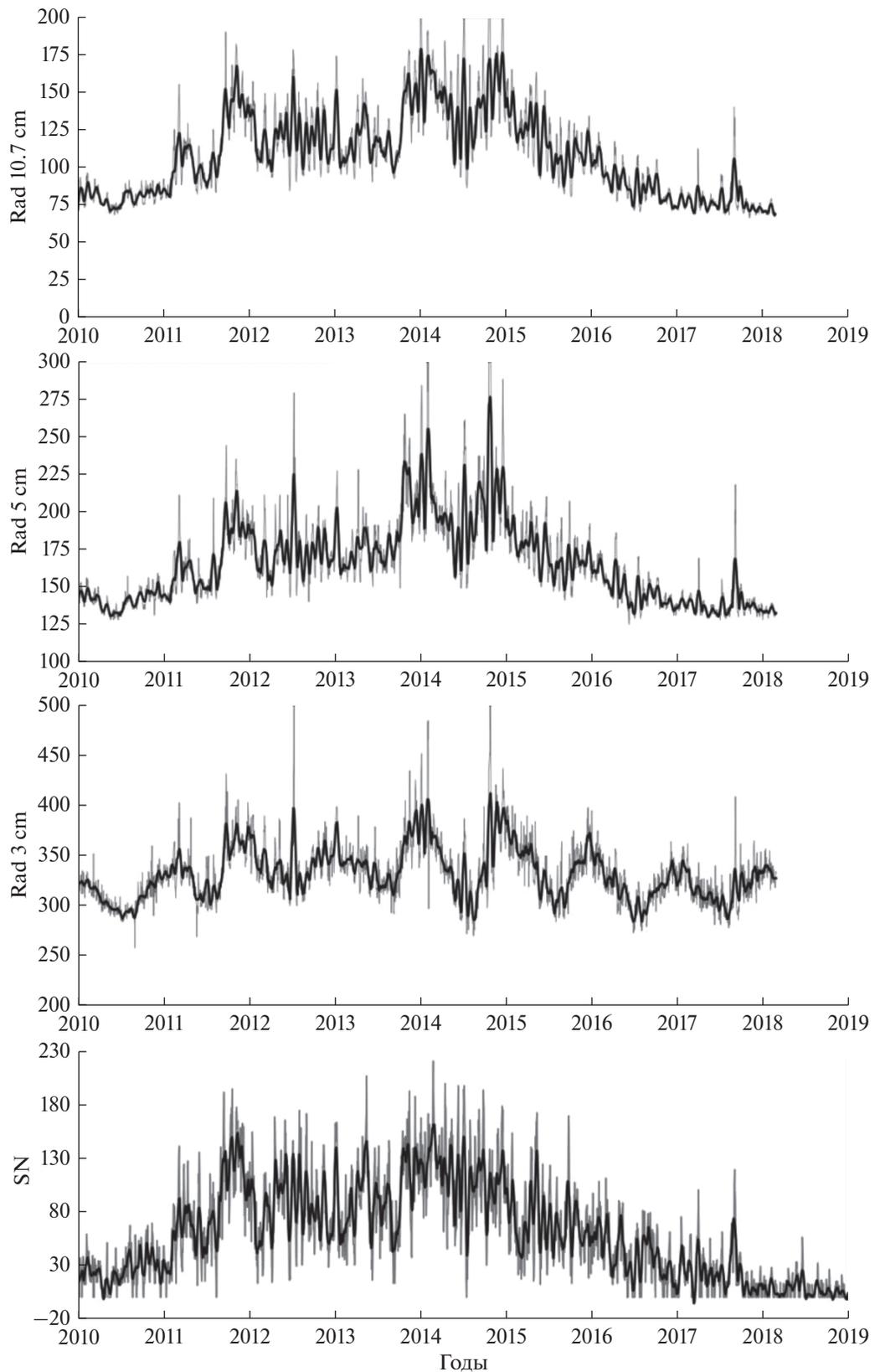
Таким образом, аккумулируя данные спектральных наблюдений на крупных инструментах РАТАН-600, VLA, CCPT и NoRH, выявляется необходимость непрерывного слежения за активностью солнечной короны в широком спектральном диапазоне радиоволн для раннего выявления возникновения предвспышечных условий и предсказаний событий, сопутствующих вспышечному явлению.

## 7. СВЯЗЬ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ИЗМЕНЕНИЯМИ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Вариации солнечного жесткого ультрафиолетового (*EUV*) излучения оказывают существенное воздействие на ионосферу и термосферу Земли. *EUV* излучение вызывает вариации многих процессов в ионосфере, тепловым балансом атмосферы, в изменении геомагнитного поля Земли через сложную цепочку физических связей [1]. Показано, что оценку потока *EUV* можно проводить по уровню микроволнового излучения Солнца, поскольку многими станциями в микроволновом диапазоне установлена почти 100% корреляция между потоком *EUV* излучения и потоком на волне 10.7 см. Так в работе [2] приводится следующее соотношение для *EUV* излучения в диапазоне (0.1–50) нм определено число  $0.18 \cdot 10^{10}$  фотонов, которому соответствует 1 с. е. п. (солнечная единица потока равная  $10^{-22}$  Вт м<sup>-2</sup> Гц<sup>-1</sup>) радиоизлучения индекса *F10.7*.

С 1951 г. в Японии начались синоптические наблюдения на четырех фиксированных частотах 1.0, 2.0, 3.75 и 9.4 ГГц [23] и использовали эти и другие данные для установления единого абсолютного фотометрического стандарта для микроволнового диапазона. Канадские (*F10.7*) и японские (четыре фиксированные частоты) наблюдения продолжают до настоящего времени.

На рис. 2 представлены изменения фоновых (вне солнечных вспышек) потоков радиоизлучения на нескольких длинах волн (*F10.7*, *F5*, *F3*) в сравнении с индексом солнечных пятен. Значения для *F10.7*, *F5*, *F3* мы взяли на сайте Кисловодской станции (<http://solarstation.ru/>). Представлены ежедневные и сглаженные скользящим ок-



**Рис. 2.** Сопоставление индексов радиоизлучения и числа пятен в течение 24-го цикла солнечной активности. На нижней панели представлен индекс числа солнечных пятен SN.

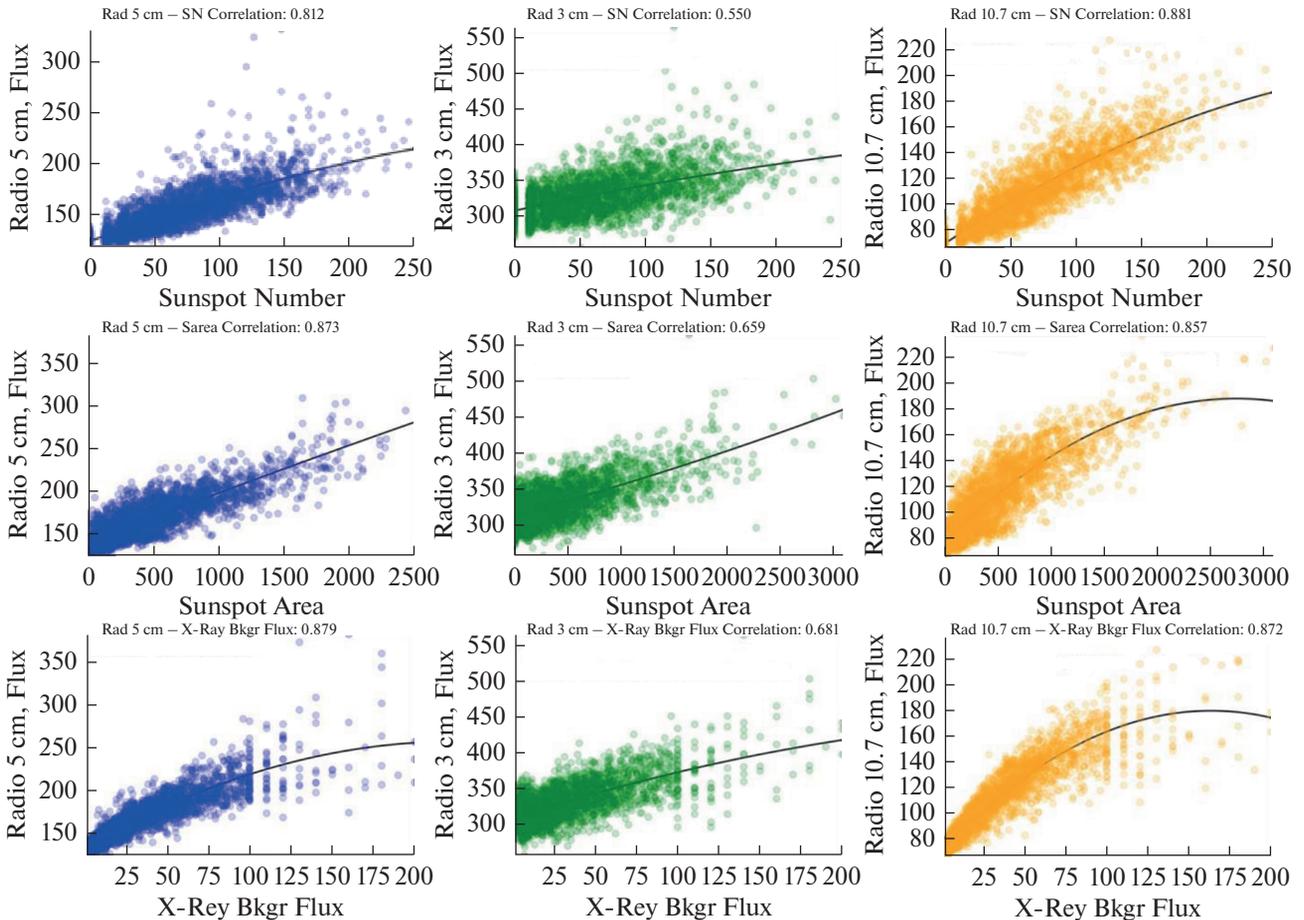


Рис. 3

ном шириной 31 день значения. Можно отметить, что изменения потока в 24-м цикле от минимума к максимуму активности составили для длин волн ( $F10.7$  и  $F5$ ) около 100 с. е. п. Индекс  $F3$  имеет сезонные вариации с максимумом в зимний период. Возможно, это связано с изменениями радиуса Солнца вследствие орбитального периода. Поведение индексов  $F10.7$  и  $F5$  имеют близкие значения. На рис. 3 представлены регрессионные зависимости для индексов  $F10.7$ ,  $F5$ ,  $F3$  и индексом солнечных пятен, индексом общей площади солнечных пятен и фоновым потоком жесткого излучения  $F_{\text{ray}}$  в диапазоне 1–8 Ангстрем. Данные взяты из файлов базы ресурса [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old\\_indices/](ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/).

Значения коэффициентов корреляции представлены в табл. 1. Можно отметить, что индекс  $F10.7$  имеет более высокую корреляцию с индексом солнечных пятен, а индекс  $F5$  более высокую корреляцию для площади солнечных пятен и фонового потока радиоизлучения. Наблюдения на длине волны 3 см, имеют невысокую корреляцию и индексами солнечной активности и потоком жесткого излучения.

Приведенные примеры указывают на возможности использования данных  $EUV$  и жесткого излучения благодаря высокой корреляции с наземными наблюдениями потока радиоизлучения без использования спутниковых данных непосредственно. Как показывают тестовые оценки наличие непрерывных оптических наблюдений и радиоданных позволяют улучшить знания о состоянии гелиогеофизической обстановки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача Сети наземных наблюдений солнечной активности – непрерывное слежение за солнечной активностью. В работе приведено описание Сети круглосуточных астрономических наземных наблюдений активности Солнца (СКАННАС), которая может быть использована для решения большого перечня фундаментальных и прикладных задач Служб Солнца и Космической Погоды, а именно: мониторинга, анализа и прогноза состояния космической погоды, в частности, солнечной активности (вспышек, потоков ультрафиолетового и рентгеновского излучения и т.д.), ра-

диационной обстановки, геомагнитной активности, условий распространения радиоволн, состояния ионосферы и атмосферы. Приведены описания астрономического инструментария патрульной станции. Рассмотрены физические основы комплексных наблюдений для широкого круга гелиогеофизических явлений. Показано, что система СКАННАС может стать необходимым инструментом как для фундаментальных задач физики Солнца, задач Космической Погоды, так и для прикладных направлений.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проекты РФФИ № 18-52-34004 и 18-02-00098, Министерством науки, технологий и окружающей среды Кубы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Svalgaard L.* Reconstruction of Solar Extreme Ultraviolet Flux 1740–2015 // *Solar Physics*. 2016. V. 291. Issue 9–10. P. 2981–3010.
2. *Svalgaard L.* Recalibration of Bartel's geomagnetic activity indices  $K_p$  and  $a_p$  to include universal time variations // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. Issue A28. P. 5182–5188.
3. *Wang Y.M., Sheeley N.R., Jr.* On potential field models of the solar corona // *Astrophys. J.* 1992. V. 392. P. 310–319.
4. *Arge C.N., Pizzo V.J.* Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № A5. P. 10465–10480.
5. *Covington A.E.* Solar Radio Emission at 10.7 cm, 1947–1968 // *J. Royal Astronomical Society of Canada*. 1969. V. 63. P. 125.
6. *Bogod V.M., Tokhchukova S.Kh.* Peculiarities of Microwave Emission from Active Regions Generating Intense Solar Flares // *Astronomy Lett.* 2003. V. 29. № 4. P. 263–273.
7. *Zhelezniakov V.V., Zlotnik E.Ya.* Cyclotron Lines in the Spectra of Solar Flares and Solar Active Regions // *Solar Physics*. 1989. V. 121. Issue 1–2. P. 449–456.
8. *Akhmedov S.B., Gelfreikh G.B., Bogod V.M. et al.* The Measurement of Magnetic Fields in the Solar Atmosphere above Sunspots Using Gyro-Resonance Emission // *Solar Physics*. 1982. V. 79. P. 41.
9. *Bogod V.M., Kaltman T.I., Yasnov L.V.* On properties of microwave sources located above the neutral line of radial magnetic field // *Astrophysical Bulletin*. 2012. V. 67. Issue 4. P. 425–437.
10. *Akhmedov Sh.B., Borovik V.N., Gelfreikh G.B. et al.* Structure of a solar active region from RATAN 600 and Very Large Array observations // *Astrophys. J.* 1986. V. 301. P. 460–464.
11. *Uralov A.M., Rudenko G.V., Rudenko I.G.* 17GHz Neutral Line Associated Sources: Birth, Motion, and Projection Effect // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 2006. V. 58. № 1. P. 21–28.
12. *Bakunina I.A., Melnikov V.F., Solov'ev A.A. et al.* Inter-sunspot Microwave Sources // *Solar Physics*. 2015. V. 290. Issue 1. P. 37–52.
13. *Somov B.V.* Non-neutral current sheets and solar flare energetics // *Astron. & Astrophys.* 1986. V. 163. P. 210.
14. *Korzhavin A.N., Lubyshv B.I.* The active region structure as deduced from RATAN-600 observations // *JOSO Annu. Rep.* 1997. P. 96–98.
15. *Kaltman T.I., Korzhavin A.N., Peterova N.G.* The Self-Inversion of the Sign of Circular Polarization in “Halo” Microwave Sources // *Solar Physics*. 2007. V. 242. Issue 1–2. P. 125–142.
16. *Gary Dale E., Hurford G.J., Nita G.M. et al.* The Expanded Owens Valley Solar Array // *American Astronomical Society. SPD meeting #42. id.1.02. Bulletin of the American Astronomical Society*. 2011. V. 43.
17. *Peterova N.G., Opeikina L.V., Topchilo N.A.* “Halo” type sources from microwave observations with high angular resolution // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014. V. 54. Issue 8. P. 1053–1057.
18. *Bogod V.M., Tokhchukova S.Kh.* RATAN-600 Microwave observations of Powerful Active Regions from October 23 to November 5, 2003 // *Cosmic Research*. 2006. V. 44. № 6. P. 506–519.
19. *Bogod V.M., Svidskiy P.M., Kurochkin E.A. et al.* A Method of Forecasting Solar Activity Based on Radio Astronomical Observations // *Astrophysical Bulletin*. 2018. V. 73. P. 478.
20. *Bogod V.M., Yasnov L.V.* Polarization of Microwave Radio Emission of Flare-Producing Solar Active Regions // *Solar Physics*. 2009. V. 255. Is. 2. P. 253–271.
21. *Abramov-Maximov V.E., Borovik V.N., Opeikina L.V. et al.* Dynamics of Microwave Sources Associated with the Neutral Line and the Magnetic-Field Parameters of Sunspots as a Factor in Predicting Large Flares // *Solar Physics*. 2015. V. 290. P. 53.
22. *Grigoryeva I.Y., Borovik V.N., Livshits M.A. et al.* Post-Eruptive Arcade Formation in the 25 January 2007 CME/Flare Limb Event: Microwave Observations with the RATAN-600 Radio Telescope // *Solar Physics*. 2009. V. 260. P. 157–175.
23. *Tanaka H., Castelli J.P., Covington A.E. et al.* Absolute Calibration of Solar Radio Flux Density in the Microwave Region // *Solar Physics*. 1973. V. 29. P. 243.

УДК 551.510.42

## ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ И РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ПОСТ-ВУЛКАНИЧЕСКОГО АЭРОЗОЛЯ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИМЕТРИИ СУМЕРЕЧНОГО НЕБА

© 2021 г. О. С. Угольников<sup>1</sup>, \*, И. А. Маслов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*ougnikov@gmail.com

Поступила в редакцию 28.02.2020 г.

После доработки 12.04.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

Измерения интенсивности и поляризации фона сумеречного неба проведены в период “пурпурных зорь” после извержения вулкана Райкоке летом 2019 г. Зафиксировано увеличение яркости и уменьшение поляризации, особенно в заревом сегменте. Используя развитые ранее методы, было найдено высотное распределение и средний радиус аэрозольных частиц. Медианный радиус логнормального распределения (0.11 мкм) типичен для фоновых условий или слабых извержений, при этом аэрозоль находился в большей степени в верхней тропосфере и вблизи тропопаузы, нежели в стратосфере. Сравнение с существующими спутниковыми данными после похожих извержений (Касаточи и др.) около 10 лет назад показали близость свойств аэрозоля, что подтверждает вулканическую природу явления “пурпурных зорь” в 2019 г.

DOI: 10.31857/S0023420621020096

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Стратосферный аэрозоль является объектом экспериментальных и теоретических исследований с момента своего открытия [1]. Он появляется при температурах и давлениях, не допускающих кристаллизацию водяного пара, имея другой химический состав, установленный в аэростатных измерениях [2]. Сульфатные частицы могут формироваться из диоксида серы  $SO_2$  вулканического происхождения, если он достигает стратосферы, химические процессы описаны в работе [3]. Это объясняет увеличение концентрации и размеров частиц после крупных извержений наподобие вулканов Эль-Чичон в 1982 г. и Пинатубо в 1991 г. [4].

Рассеяние солнечного света частицами аэрозоля порождает оптические явления, которые могут наблюдаться в сумерки, когда стратосфера еще освещена Солнцем, а тропосфера уже погружена в тень Земли. Эффект “пурпурной зари” был замечен после извержения вулкана Кракатау в 1883 г. [5], задолго до непосредственного открытия аэрозольных частиц в стратосфере. Рассеяние света частицами описывается теорией Ми, оно не имеет избытка в красной спектральной области, пока размер частиц не превосходит 0.3 мкм. Пурпурный цвет зари — результат поглощения солнечной радиации в полосах Шапю озоны (желто-зеленая область) и релеевского ослабления (в основном, в фиолетовой и синей области).

Однако, в вулканически-спокойные периоды концентрация аэрозоля не падает до нуля. Фоновые аэрозольные частицы изучались непосредственно в аэростатных экспериментах [6]. Имея тот же химический состав, они появляются на высоте около 20 км и имеют средний радиус около 0.1 мкм, в то время как поствулканический аэрозоль наблюдается чуть ниже (кроме случая крупных извержений), а его частицы после крупных извержений больше [7]. Эффект “пурпурной зари” также наблюдался и в вулканически-спокойные периоды [8].

Источником невулканических сульфатных аэрозольных частиц может быть карбонилсульфид OCS [9]. Имея большой порог диссоциации и окисления, OCS требует большего потока ультрафиолетового излучения Солнца для образования сульфатных частиц, что объясняет разницу высот фонового и вулканического аэрозоля [10]. Аэростатные измерения, проводимые в течение нескольких десятилетий [6], не показали заметных трендов количества фонового аэрозоля, однако его вертикальная оптическая толщина начала возрастать в 2000-х гг., после того, как стратосфера очистилась от продуктов извержения вулкана Пинатубо [11]. Рассматривалась возможность антропогенных причин этого явления, так как концентрация OCS в атмосфере увеличилась по сравнению с доиндустриальной эпохой [13]. Однако, рост уровня аэрозоля мог быть связан и с извержениями вулканов средней мощности в 2000-х гг. [14].

Тропические вулканы (Рабаул в 2006 г., Набро в 2011 г.) могут вызывать глобальный эффект за счет циркуляции Брюера–Добсона. В случае вулкана Набро выбросы могли достигать стратосферы за счет муссонного переноса [15]. Вулканы северного полушария (Касаточи в 2008 г., пик Сарычева в 2009 г., Эйяфлатлайокуддль в 2010 г.) создают заметный эффект в высоких северных широтах. Так как тропопауза там располагается существенно ниже, чем в тропиках (11–12 км), среднее по силе извержение может привести к проникновению значительного количества диоксида серы в стратосферу.

Вопрос о причинах роста уровня стратосферного аэрозоля в первое десятилетие XXI века должен был решаться в следующее десятилетие, которое оказалось более вулканически-спокойным. Некоторое уменьшение вертикальной оптической толщины аэрозоля было отмечено уже в начале 2010-х гг. [16, 17]. Поляризационные измерения фона сумеречного неба [18] показали негативный тренд оптической толщины на протяжении восьми лет, фактически подтверждающая вулканическую природу изменений в 2000-х гг..

Извержение вулкана Райкоке (48.3° N, 153.3° E) на Курильских островах (Россия) 21.VI.2019 г. создало самый сильный стратосферный эффект в северном полушарии после извержения Набро в 2011 г. В соответствии с данными Глобальной программы вулканизма [19], выбросы достигли высот около 13 км. Высота тропопаузы над вулканом на основе спутниковых данных EOS *Aura*/MLS о температуре [20] составляла 12 км. После распространения облака SO<sub>2</sub> над северным полушарием во второй половине лета и осенью 2019 г. наблюдались эффекты “пурпурной зари”. Для того, чтобы подтвердить их вулканическую природу, необходимы измерения высоты и размеров частиц аэрозоля и их сравнения с эпохами похожих извержений типа Касаточи и пика Сарычева. В настоящей работе это делается на основе поляризационного анализа фона неба и методики, развитой в [18] для анализа стратосферного аэрозоля.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Измерения интенсивности и поляризации фона сумеречного неба производилась широкоугольной поляризационной камерой, описанной в [21, 22] и установленной в Подмоскowie (55.2° N, 37.5° E). Диаметр поля зрения камеры 140°, условия наблюдения ограничивают зенитное расстояние рассматриваемых точек солнечного вертикала  $\zeta$  значениями  $\pm 50^\circ$ . Наблюдения проводятся в спектральной полосе с эффективной длиной волны 540 нм и шириной по уровню половины максимума, равной 90 нм. Камера включается до захода Солнца и продолжает работать до утра. Точное положение камеры, кривизна поля и прозрачность

атмосферы контролируется по положениям звезд на изображениях ночного неба.

Плохие погодные условия лета 2019 г. ограничили число наблюдений, настоящая работа базируется на анализе безлунных утренних сумерек 10.IX.2019 и 12.IX.2019 и их сравнению с аналогичными утренними данными осени 2018 г.

На рис. 1 показана геометрия однократного рассеяния света во время сумерек. Избыток яркости в заревом сегменте может появляться по двум причинам. Во-первых, там меньше высота тени Земли, и более плотные слои атмосферы дольше освещены Солнцем. Разница эффективных высот тени увеличивается в темные сумерки, и этот фактор сильнее всего сказывается для явлений в верхних слоях атмосферы наподобие серебристых облаков [23–25]. Во-вторых, аэрозольные частицы имеют преимущественное направление рассеянного излучения под малыми углами к направлению приходящего излучения, что создает избыток яркости в заревом сегменте. Оба эффекта хорошо заметны, если построить зависимость отношения интенсивности фона неба в симметричных точках солнечного вертикала  $I(\zeta)/I(-\zeta)$  от зенитного расстояния Солнца  $z$ . На рис. 2 показаны такие зависимости для вулканически-чистой стратосферы в 2018 г. и во время периода “пурпурных зорь” в 2019 г. (полужирные линии). Асимметрия яркости в темные сумерки присутствует в обоих случаях (правая часть рис.), в то время как аэрозольный эффект в левой части рис. появляется в 2019 г.

Эффекты аэрозольного рассеяния также заметны на зависимости поляризации фона неба от зенитного расстояния Солнца, показанной на рис. 3 для зенита ( $\zeta = 0^\circ$ ). В светлые ясные сумерки в случае фонового стратосферного аэрозоля фон характеризуется высокой поляризацией, достигающей 0.8. Осенью 2019 г. поляризация заметно меньше в течение всего периода сумерек, включая темную фазу, когда тропосфера и стратосфера погружены в тень Земли. Как мы увидим далее, это связано с многократным рассеянием света, в частности, на частицах стратосферного аэрозоля. Суммарный эффект от аэрозольного рассеяния уменьшает поляризацию фона неба в зените на восходе Солнца примерно до 0.5.

В настоящей работе свойства аэрозоля, формирующего эффект “пурпурной зари”, восстанавливаются на основе метода [18], развитого на случай переменного размера частиц. Метод базируется на численном интегрировании однократного рассеяния и использовании эмпирических свойств многократного рассеяния. Результаты могут показать, насколько происхождение аэрозоля может быть связано с извержением вулкана Райкоке.

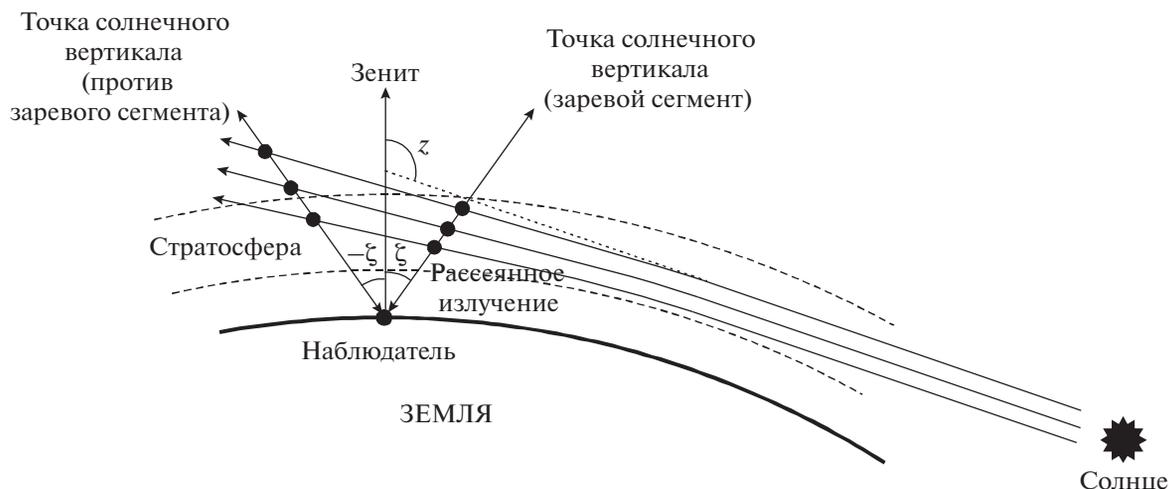


Рис. 1. Геометрия однократного рассеяния света в период сумерек.

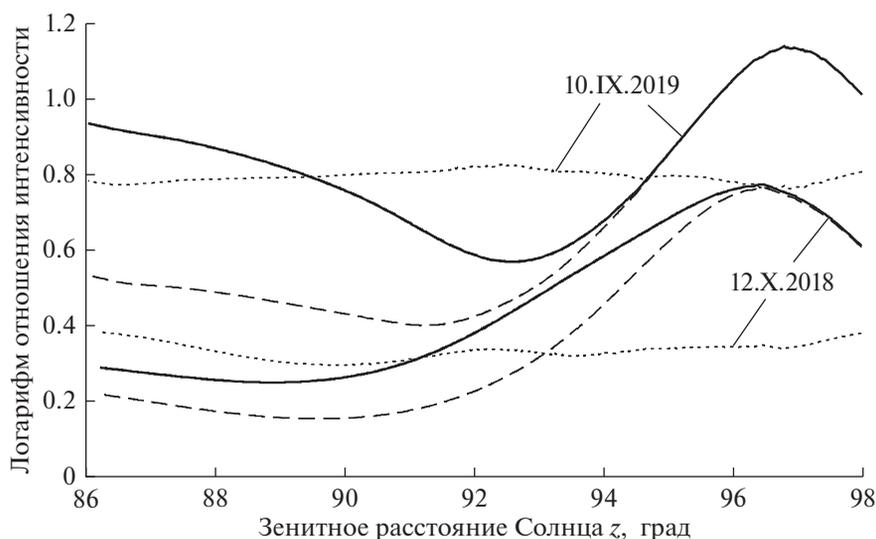


Рис. 2. Логарифм отношения интенсивности в симметричных точках солнечного вертикала ( $\zeta = 45^\circ$ ) для всего фона неба ( $I$ , полужирные линии), без однократного аэрозольного рассеяния ( $I_C$ , пунктирные линии) и для многократного рассеяния ( $I_M$ , мелкий пунктир) во время сумерек осенью 2018 и 2019 г.

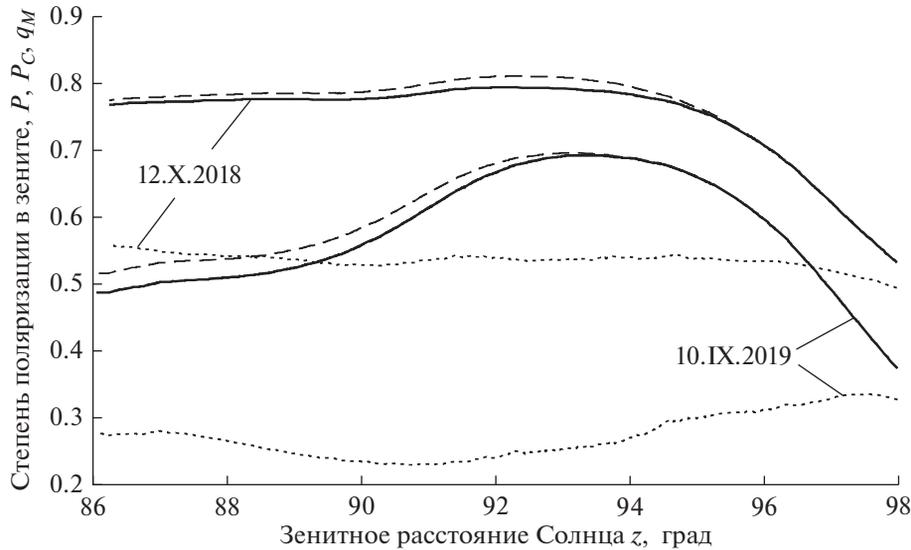
### 3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СВОЙСТВ АЭРОЗОЛЯ

Процедура восстановления свойств аэрозольной компоненты похожа на подробно описанную и использовавшуюся в [18]. Пусть  $I(\zeta, z)$  и  $P(\zeta, z)$  – измеренные значения интенсивности и поляризации (первой и нормализованной второй компоненты вектора Стокса) фона неба,  $z$  – зенитное расстояние Солнца,  $\zeta$  – зенитное расстояние точки солнечного вертикала, положительное в области зари и отрицательное в противоположной части неба (см. рис. 1). Для тех же значений  $z$  и  $\zeta$  теоретические значения интенсивности однократного молекулярного и аэрозольного рассеяния мы обозначаем как  $J_{0R}(\zeta, z, A_i)$  и  $J_{0A}(\zeta, z, r_0, A_i)$ . Здесь мы предполагаем

распределение аэрозольных частиц по размерам логнормальным с медианным радиусом  $r_0$  и шириной распределения  $\sigma = 1.6$  [4, 26–28]:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta r} \exp\left(\frac{-\ln^2(r/r_0)}{2\zeta^2}\right); \quad \zeta = \ln \sigma. \quad (1)$$

Параметры  $A_i$  равны отношению коэффициентов аэрозольного и молекулярного ослабления на высотах  $h_i$ . Эти высоты определены с шагом 5 км и равны 5, 10, ..., 60 км. Так как аэрозоль ослабляет солнечное излучение до рассеяния, интенсивность молекулярного рассеяния  $J_{0R}$  также зависит от параметров  $A_i$ . Поляризация молекулярного и



**Рис. 3.** Степень поляризации в зените для всего фона неба ( $P$ , полуштриховые линии), без однократного аэрозольного рассеяния ( $P_C$ , пунктирные линии) и для многократного рассеяния ( $q_M$ , мелкий пунктир) во время сумерек осенью 2018 и 2019 гг.

аэрозольного рассеяния  $p_0(z - \zeta)$  и  $p_A(z - \zeta, r)$  определяются законом Релея и теорией Ми соответственно. Угол однократного рассеяния равен  $z - \zeta$ , влияние рефракции на эту величину пренебрежимо мало (однако, рефракция существенно влияет на траекторию распространения излучения). Коэффициент преломления сульфатной частицы берется равным 1.44 [29].

Теоретические вычисления поля однократного рассеяния для каждой даты наблюдений проводятся с учетом молекулярного и аэрозольного рассеяния, рефракции и поглощения озоном в полосах Шапю на основе спутниковых профилей температуры и концентрации озона по данным EOS *Aura*/MLS [20, 30]. Величины релеевского и аэрозольного однократного рассеяния, зафиксированные во время наблюдений, равны

$$\begin{aligned} J_R(\zeta, z, A_i) &= J_{0R}(\zeta, z, A_i)(K_1 + K_2 \zeta^2); \\ J_A(\zeta, z, r_0, A_i) &= J_{0A}(\zeta, z, r_0, A_i)(K_1 + K_2 \zeta^2). \end{aligned} \quad (2)$$

Значения параметров  $K_1$  и  $K_2$  изначально неизвестны. На них влияет чувствительность камеры, ее плоское поле и возможные неточности измерений прозрачности атмосферы по изображениям звезд на кадрах ночного неба. Вычитая поле однократного рассеяния из полного фона, мы получаем интенсивность и поляризацию многократно рассеянной компоненты:

$$\begin{aligned} j_M &= I - J_R - J_A; \\ q_M &= \frac{IP - J_R p_R - J_A p_A}{I - J_R - J_A}. \end{aligned} \quad (3)$$

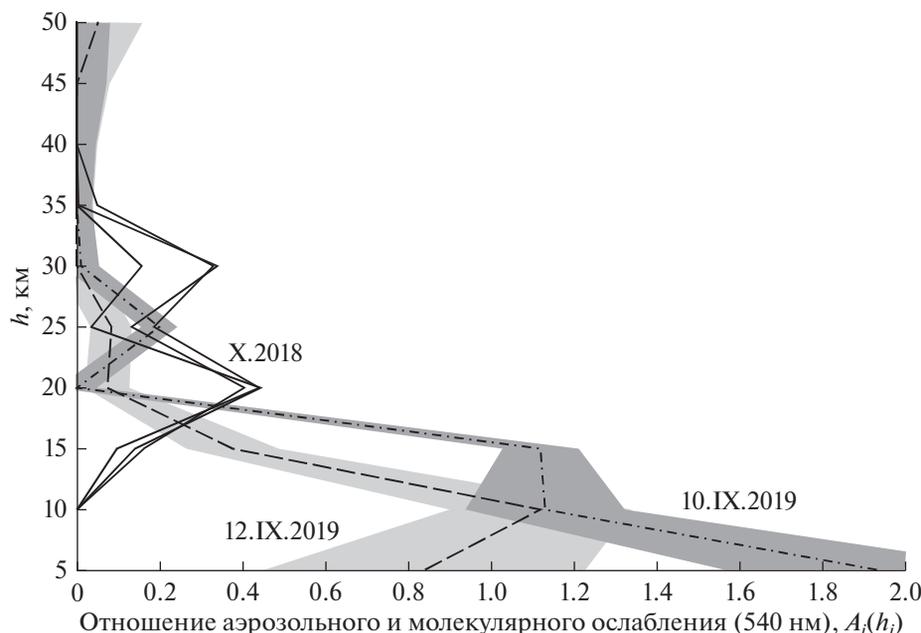
Эмпирическое свойство многократного рассеяния, установленное на основе измерений в темные сумерки [21, 22, 31, 32], заключается в равенстве градиентов интенсивности и поляризации в симметричных точках солнечного вертикала:

$$\begin{aligned} \frac{d \ln j_M(\zeta, z)}{dz} &= \frac{d \ln j_M(-\zeta, z)}{dz}; \\ \frac{dq_M(\zeta, z)}{dz} &= \frac{dq_M(-\zeta, z)}{dz}. \end{aligned} \quad (4)$$

Как и в работе [18], мы используем это свойство как критерий для процедуры поиска значений величин  $r_0$ ,  $A_i$ ,  $K_1$  и  $K_2$  по методу наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} \sum_z \sum_{\zeta} \left( \frac{d \ln j_M(\zeta, z)}{dz} - \frac{d \ln j_M(-\zeta, z)}{dz} \right)^2 + \\ + \left( \frac{dq_M(\zeta, z)}{dz} - \frac{dq_M(-\zeta, z)}{dz} \right)^2 = \min. \end{aligned} \quad (5)$$

Задача решается итерационным методом. На каждом этапе сначала определяются значения  $K_1$  и  $K_2$  на основе измерений в темные сумерки ( $96^\circ < z < 99^\circ$ ) при малом вкладе однократного аэрозольного рассеяния. После этого находятся все остальные неизвестные величины. Для фиксации аэрозольного рассеяния вблизи тропопавзы в рассмотрение необходимо включить нижний слой с высотой 5 км, соответствующий величине  $A_1$ , и расширить интервал рассматриваемых зенитных расстояний Солнца до  $86^\circ < z < 98^\circ$  (в работе [18] нижний рассматриваемый слой имел



**Рис. 4.** Вертикальные профили отношения аэрозольного и молекулярного ослабления в 2018 г. (сплошные линии) и в 2019 г. (пунктир и штрих-пунктир с областями погрешностей).

высоту 10 км, а интервал зенитных расстояний Солнца  $-90^\circ < z < 98^\circ$ .

Изначально рассматривается модель с постоянным медианным радиусом частиц  $r_0$ . В табл. 1 (левая колонка значений) приведены значения  $r_0$ , полученные для осенних сумерек 2018 и 2019 гг. Они близки к 0.1 мкм, в согласии с результатами аэростатных экспериментов [4, 6] и приближенного анализа цвета и поляризации сумеречного неба [27, 28] в фоновых условиях. Близкая величина (0.08 мкм) берется как априорная в спутниковом лимбовом анализе эксперимента OSIRIS [26].

На рис. 4 приведены вертикальные профили отношения аэрозольного и молекулярного ослабления, восстановленные на основе описанного анализа (величины  $A_i$ ). Осенью 2018 г. мы видим типичный слой Юнге в стратосфере. Дополнительное аэрозольное рассеяние появляется в верхней тропосфере и вблизи тропопаузы осенью

2019 г. Оно распространяется выше в стратосферу не столь значительно, профиль от 10.IX.2019, вероятно, представлен двумя отдельными слоями.

Для более точной оценки размера частиц аэрозоля в нижнем слое (5–15 км) в 2019 г. необходимо запустить процедуру с фиксированным значением  $r_0 = 0.1$  мкм в более высоких слоях (от 20 км). Результаты представлены в правой колонке табл. 1. Медианный радиус нижней фракции оказывается совсем ненамного большим (0.11 мкм), разница меньше погрешности определения величины  $r_0$  описанным выше методом. Та же величина 0.11 мкм получается из поляризационного анализа сумеречного неба после извержения вулкана Рабаул в 2006 г. [33].

На рис. 2 и 3 приведены характеристики “чистого” фона неба (логарифм отношения яркостей в симметричных точках вертикала и поляризация в зените, пунктирные линии), получаемые при

**Таблица 1.** Медианный радиус частицы  $r_0$  для логнормального распределения с шириной  $\sigma = 1.6$ , восстановленный как общий для всех высот и отдельно для высот 5–15 км в предположении  $r_0 = 0.1$  мкм выше

Дата (утренние сумерки)	Медианный радиус (общий для всех слоев)	Медианный радиус на 5–15 км (фиксированное значение $r_0 = 0.1$ на больших высотах)
12.X.2018	$0.102 \pm 0.011$	—
17.X.2018	$0.113 \pm 0.023$	—
20.X.2018	$0.091 \pm 0.019$	—
10.IX.2019	$0.111 \pm 0.012$	$0.110 \pm 0.011$
12.IX.2019	$0.101 \pm 0.025$	$0.107 \pm 0.024$

вычитании поля однократного аэрозольного рассеяния:

$$\ln \frac{I_C(\zeta, z)}{I_C(-\zeta, z)} = \ln \frac{I(\zeta, z) - J_A(\zeta, z)}{I(-\zeta, z) - J_A(-\zeta, z)}; \quad (6)$$

$$P_C(0, z) = \frac{I(0, z)P(0, z) - J_A(0, z)P_A(0, z)}{I(0, z) - J_A(0, z)}.$$

Аналогичные характеристики многократно рассеянного фона ( $\ln j(\zeta, z)/j(-\zeta, z)$  и  $q_M(0, z)$ ) показаны на тех же рис. мелким пунктиром. Видно, что многократное рассеяние сохраняет почти постоянное отношение яркостей в симметричных точках вертикали и поляризацию в течение сумерек, вполне удовлетворяя критерию (4). Увеличение количества аэрозоля влияет на свойства многократного рассеяния, уменьшая его поляризацию и усиливая асимметрию яркости в течение всего периода сумерек. Именно многократное рассеяние с участием аэрозоля является основной причиной уменьшения поляризации фона неба. Данный эффект объясняет корреляцию величины поляризации в светлый и темный период сумерек, несмотря на то, что однократное рассеяние происходит в совершенно разных слоях атмосферы [34].

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе поляризационный анализ фона сумеречного неба использовался для выявления дополнительного аэрозольного рассеяния и оценки среднего размера частиц в период “пурпурных зорь” ранней осенью 2019 г. Слой аэрозоля оказался расположенным в основном в верхней тропосфере, незначительно распространяясь в стратосферу. Его положение существенно ниже слоя Юнге фонового стратосферного аэрозоля. Это можно объяснить тем, что высота выбросов вулкана Райкоке не превышала 15 км. Диоксид серы может образовывать сульфатный аэрозоль на таких высотах, тогда как окисление карбонилсульфида OCS происходит выше.

Анализ аэрозольного ослабления света после извержения вулкана Касаточи в 2008 г. по спутниковым данным CALIPSO [10] показал постепенное опускание слоя к тропопаузе и верхней тропосфере в течение нескольких месяцев после извержения. Отметим, что высота тропопаузы во время наблюдений составляла по спутниковым данным 11 км [20], что близко к найденной средней высоте аэрозоля. На этой же высоте проходят трассы транзитных самолетов к югу от Москвы в восточном направлении, тени от их инверсионных слоев часто наблюдались на фоне “пурпурной зари”.

Найденное значение высоты исключает роль вулканического аэрозоля в конденсации частиц полярных стратосферных облаков в северных

широтах зимой 2019–2020 гг. Они образуются в области глубокого температурного минимума (<190 К, выше 21 км) в условиях мощного полярного стратосферного вихря этой зимы.

Сильная зависимость поляризации рассеянного излучения от медианного размера частиц в соответствии с теорией Ми делает поляризационные измерения эффективным средством анализа микрофизических свойств аэрозоля. Значение медианного радиуса составляет  $0.11 \pm 0.02$  мкм, что вполне соответствует слабым или средним извержениям. Наблюдательные свойства аэрозоля в целом подтверждают его связь с извержением вулкана Райкоке в июне 2019 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Junge C.E., Changnon C.W., Manson J.E. Stratospheric aerosols // J. Meteorology. 1961. V. 18. P. 81–108.
2. Rosen J.M. The boiling point of stratospheric aerosols // J. Applied Meteorology. 1971. V. 10. P. 1044–1046.
3. Weisenschein K.D., Yue G.K., Ko M.K.W. et al. A two-dimensional model of sulfur species and aerosol // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 13019–13035.
4. Deshler T., Hervig M.E., Hofmann D.J. et al. Thirty years of in situ stratospheric aerosol size distribution measurements from Laramie, Wyoming (41° N), using balloon-borne instruments // J. Geophysical Research. 2003. V. 108. N. 5. P. 4167–4179.
5. Clark J.E. The remarkable sunsets // Nature. 1883. V. 29. P. 130.
6. Deshler T. et al. Trends in the nonvolcanic component of stratospheric aerosol over the period 1971–2004 // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. P. D01201.
7. Bauman J.J., Russell P.B., Geller M.A., Hamill P. A stratospheric aerosol climatology from SAGE II and CLAES measurements: 2. Results and comparisons, 1984–1999 // J. Geophysical Research. 2003. V. 108. N. 13. P. 4383–4412.
8. Lee R., Jr., Hernández-Andrés J. Measuring and modeling twilight’s purple light // Applied Optics. 2003. V. 42. P. 445–457.
9. Crutzen P.J. The possible importance of CSO for the sulfate layer of the stratosphere // Geophysical Research Letters. 1976. V. 3. P. 73–76.
10. Andersson S.M., Martinsson B.G., Vernier J.-P. et al. Significant radiative impact of volcanic aerosol in the lowermost stratosphere // Nature Communications. 2015. V. 6. P. 7692.
11. Solomon S., Daniel J.S., Neely R.R. et al. The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change // Science. 2011. V. 333. P. 866–870.
12. Campbell J.E., Whelan M.E., Seibt U. Smith et al. Atmospheric carbonyl sulfide sources from anthropogenic activity: Implications for carbon cycle constraints // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. P. 3004–3010.
13. Aydin M., Fudge T.J., Verhulst K.R. et al. Carbonyl sulfide hydrolysis in Antarctic ice cores and an atmospheric history for the last 8000 years // J. Geophysical Research. 2014. V. 119. P. 8500–8514.

14. *Neely R.R., Toon O.B., Solomon S. et al.* Recent anthropogenic increases in SO<sub>2</sub> from Asia have minimal impact on stratospheric aerosol // *Geophysical Research Letters*. 2013. V. 40. P. 999–1004.
15. *Bourassa A.E., Robock A., Randel W.J. et al.* Large Volcanic Aerosol Load in the Stratosphere Linked to Asian Monsoon Transport // *Science*. 2012. V. 337. P. 78–81.
16. *Ridley D.A. et al.* Total volcanic stratospheric aerosol optical depths and implications for global climate change // *Geophysical Research Letters*. 2014. V. 41. P. 7763–7769.
17. *Kremser S. et al.* Stratospheric aerosol – Observations, processes, and impact on climate // *Reviews of Geophysics*. 2016. V. 54. P. 278–335.
18. *Ugolnikov O.S., Maslov I.A.* Optical depths and vertical profiles of stratospheric aerosol based on multi-year polarization measurements of the twilight sky // *J. Aerosol Science*. 2019. V. 127. P. 93–101.
19. Global Volcanism Program. Report on Raikoke (Russia) / Eds. Craddock A.E., Venzke E. // *Bulletin of the Global Volcanism Network*. 2019. 44:8. Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN201908-290250>
20. EOS MLS Science Team. *MLS/Aura Level 2 temperature, version 003*. Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center (GES DISC). 2011.
21. *Угольников О.С., Маслов И.А.* Оптические свойства невозмущенной мезосферы на основе широкоугольной поляриметрии фона сумеречного неба // *Космич. исслед.* 2013. Т. 51. № 4. С. 267–273 (*Cosmic Research*. P. 235–240).
22. *Ugolnikov O.S., Maslov I.A.* Summer mesosphere temperature distribution from wide-angle polarization measurements of the twilight sky // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2013. V. 105–106. P. 8–14.
23. *Ugolnikov O.S., Maslov I.A., Kozelov B.V., Dlugach J.M.* Noctilucent cloud polarimetry: twilight measurements in a wide range of scattering angles // *Planetary and Space Science*. 2016. V. 125. P. 105–113.
24. *Ugolnikov O.S., Galkin A.A., Pilgaev S.V., Roldugin A.V.* Noctilucent cloud particle size determination based on multi-wavelength all-sky analysis // *Planetary and Space Science*. 2017. V. 146. P. 10–19.
25. *Ugolnikov O.S., Maslov I.A.* Polarization analysis and probable origin of bright noctilucent clouds with large particles in June 2018 // *Planetary and Space Science*. 2019. V. 179. P. 104713.
26. *Bourassa A.E., Degenstein D.A., Llewellyn E.J.* Retrieval of stratospheric aerosol size information from OSIRIS limb scattered sunlight spectra // *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 2008. V. 8. P. 4001–4016.
27. *Угольников О.С., Маслов И.А.* Исследования фонового стратосферного аэрозольного слоя с помощью многоцветных широкоугольных измерений фона сумеречного неба // *Космич. исслед.* 2018. Т. 56. № 2. С. 97–104. (*Cosmic Research*. P. 85–93).
28. *Ugolnikov O.S., Maslov I.A.* Stratospheric aerosol particle size distribution based on multi-color polarization measurements of the twilight sky // *J. Aerosol Science*. 2018. V. 117. P. 139–148.
29. *Russell P.B., Hamill P.* Spatial variation of stratospheric aerosol acidity and model refraction index: Implication of recent results // *J. Atmospheric Science*. 1984. V. 41. P. 1781–1790.
30. EOS MLS Science Team. *MLS/Aura level 2 ozone (O3) mixing ratio V003*. Greenbelt, MD, USA: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2011.
31. *Угольников О.С.* Фотометрия и поляриметрия сумеречного неба. Проблема многократного рассеяния света в период сумерек // *Космич. исслед.* 1999. Т. 37. № 2. С. 168–175. (*Cosmic Research*. P. 159–166).
32. *Угольников О.С., Маслов И.А.* Многоцветная поляриметрия сумеречного неба. Роль многократного рассеяния света как функция длины волны // *Космич. исслед.* 2002. Т. 40. № 3. С. 242–251. (*Cosmic Research*. P. 224–232).
33. *Угольников О.С., Маслов И.А.* Исследования стратосферного аэрозольного слоя на основе поляризационных измерений сумеречного неба // *Космич. исслед.* 2009. Т. 47. № 3. С. 219–228. (*Cosmic Research*. P. 198–207).
34. *Ugolnikov O.S., Maslov I.A.* Detection of Leonids meteoric dust in the upper atmosphere by polarization measurements of the twilight sky // *Planetary and Space Science*. 2007. V. 55. P. 1456–1463.

УДК 621.371

## НИЖНЯЯ ИОНОСФЕРА АРКТИКИ В ИЮНЕ 2015 г. ПРИ СИЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРЕ И СОЛНЕЧНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШКАХ ПО ДАННЫМ ЗАТМЕННОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ НА МЕЖСПУТНИКОВЫХ ТРАССАХ GPS – FORMOSAT

© 2021 г. С. С. Матюгов<sup>1</sup>, О. И. Яковлев<sup>1, \*</sup>, А. А. Павельев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

\*oiy117@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 24.12.2019 г.

После доработки 25.02.2020 г.

Принята к публикации 05.03.2020 г.

Представлены результаты определений высотного профиля электронной концентрации  $N(h)$  в период дневного солнцестояния 19–30.VI.2015 г. Даны зависимости  $N(h)$ , зарегистрированные при спокойном состоянии и наличии спорадических структур разной интенсивности. Определены гистограммы распределения изменчивой концентрации плазмы для четырех значений высоты нижней ионосферы. Показано, что на высоте 100 км под действием вспышки рентгеновского излучения Солнца происходит увеличение электронной концентрации в 4–5 раз. Рассмотрены проявления разных типов спорадических образований в изменениях амплитуды радиосигналов и выделены три типа вариаций амплитуды, характерных для спорадических структур.

DOI: 10.31857/S0023420621020060

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с созданием межспутниковых радиотрасс появилась возможность осуществлять затменное зондирование ионосферы и атмосферы в разных районах Земли. Этот метод использует данные изменений амплитуды и фазы двух когерентных сигналов дециметровых радиоволн при заходе исследовательского спутника–приемника за лимб Земли относительно навигационного спутника GPS – излучателя радиоволн. Вариации амплитуды и фазы сигналов при изменении высоты лучевой линии позволяют определять высотные профили различных характеристик ионосферы и атмосферы. В первых публикациях [1–6] были показаны реальные возможности метода затменного зондирования. Убедительные данные об эффективности затменного метода для исследования ионосферы в средних широтах приведены в статье [7], где дано сравнение высотных профилей электронной концентрации  $N(h)$ , полученных затменным методом и с помощью традиционного вертикального высотного-частотного зондирования. Показано, что в средних широтах отличие  $N(h)$  на высотах  $h = 200–300$  км, полученное этими методами, не превосходит 20%, а в нижней ионосфере, особенно при появлении спорадических  $E_S$  структур на высотах  $h = 120–140$  км, это различие может достигать 40%. Спорадические

$E_S$  образования в средних широтах долго являлись предметом дискуссий и исследований, ныне признано, что они обусловлены в основном ветровыми сдвигами. Это явление подробно исследовано затменным методом в приэкваториальной области и средних широтах в [8–12], где показано, что метод эффективен для детального изучения  $E_S$  образований и ветровых сдвигов в обширных районах Земли.

Особенно трудны исследования сильно изменчивой полярной ионосферы, итоги первого этапа таких исследований приведены в книге [13]. Этот этап базируется на обширном экспериментальном материале, полученном в основном наземными средствами в районах Арктики с широтами меньшими  $70^\circ$ . Регулярные исследования ионосферы на большой территории Арктики при широте большей  $70^\circ$  стали возможны благодаря развитию разных спутниковых методов регистрации параметров плазмы. Радиозатменный метод проявил эффективность при изучении вертикального профиля  $N(h)$  и спорадических образований ночной ионосферы Арктики [14–19]. В этих работах показана возможность анализа ночной ионосферы Арктики в период с 25.X. по 9.XI.2003 г., когда была сильная солнечная активность, обуславливающая резкие изменения нижней ионосферы. Чувствительность затменного метода оказалась

достаточной для определений профиля  $N(h)$  и характеристик  $E_S$  образований при низкой электронной концентрации ночной ионосферы. Сложнее использовать этот метод для изучения изменчивой дневной ионосферы Арктики, т.к. вариации  $N(h)$  на больших высотах могут приводить к кажущимся, трудно контролируемым изменениям профиля  $N(h)$  нижней ионосферы.

Цель этой статьи состоит в совместном анализе изменений амплитуды радиосигналов, вариаций высотного профиля  $N(h)$  нижней ионосферы и гелиогеофизических явлений, существенных для понимания изменчивости дневной полярной ионосферы. Дадим подробный анализ вариаций радиосигналов и ионосферных характеристик в период июня 2015 г., когда было наложение двух явлений – сильной магнитной бури и рентгеновских солнечных вспышек. Приведем результаты затненного зондирования ионосферы, осуществленные в указанное время, когда были периоды и сильной изменчивости и спокойного состояния. В этой статье под ионосферой будем понимать ее нижнюю часть на высотах 90–200 км. Регулярное затненное зондирование полярной ионосферы осуществлялось с помощью межспутниковой радиосистемы GPS – Formosat, имеющей два когерентных частотных канала  $f_1 = 1575$  МГц и  $f_2 = 1207$  МГц. Сигналы частоты  $f_2$  использовались для регистрации изменений амплитуды радиоволн, а по вариациям приведенной разности фаз двух когерентных сигналов определялись высотные профили  $N(h)$ . Затненное зондирование осуществлялось с помощью сигналов 24 навигационных аппаратов GPS и нескольких спутников Formosat, что позволило анализировать большую массив данных о состоянии ионосферы в разных районах при различном времени. Всего в указанный период мы проанализировали изменения амплитуды и фазы в 600 сеансах затненного зондирования ионосферы, при широте большей  $67^\circ$ . В этой статье не приводится описание затненного метода, т.к. в книгах [20–23] дано детальное изложение принципов и особенностей этого способа мониторинга ионосферы и атмосферы Земли.

### 1. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ СПОРАДИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ

Изменения амплитуды сигналов  $A(h)$  регистрировались при  $h < 120$  км с частотой 50 Гц. Из-за особенности межспутникового канала связи GPS – Formosat среднее значение  $A$  в сеансах зондирования ионосферы было различным, поэтому уровень  $A_0$  при  $h = 40$ – $60$  км принимался за опорный и осуществлялась нормировка к этому уровню, т.е. полагалось, что в каждом сеансе зондирования при  $h = 40$ – $60$  км  $A/A_0 = 1$ . Изменчивая зави-

симость напряженности поля от высоты перигея лучевой линии  $A(h)$  может быть обусловлена разными факторами: вертикальным градиентом электронной концентрации  $N(h)$ , пространственной неоднородностью среды, турбулентностью и структурой распределения ветров. Анализ графиков  $A(h)$  показал, что они естественно разделяются на три характерные группы, отличающиеся видом зависимости  $A(h)$  и толщиной  $\Delta h$  структуры  $E_S$ . На рис. 1 приведены примеры изменений  $A(h)$  для этих групп. Для типичного верхнего графика 1 характерно беспорядочное изменение напряженности поля, свидетельствующее о сильной неоднородности плазмы при значительных вариациях толщины  $\Delta h \approx 30$ – $20$  км. Они наблюдаются в основном в периоды сильного возмущения ионосферы, по-видимому, структуры первого типа обусловлены высыпанием энергичных частиц из магнитосферы. Второй тип отличается почти регулярной повторяемостью зависимости  $A(h)$ , когда в узком интервале высот  $\Delta h \approx 2$ – $3$  км наблюдаются  $A(h)$ , где видны характерные изменения: максимум – минимум, второй максимум и переход к уровню  $A = 1$ . Такой тип  $A(h)$  характерен для узкой слоистой структуры без сильной неоднородности среды. В [8] показано, что для таких структур справедливо представление о локальной сферической симметрии, когда вторая производная фазы по высоте в точности повторяет зависимость  $A(h)$ . Из экспериментальных данных следует, что в большинстве сеансов регистрации зависимостей второго типа это условие хорошо выполняется. Они регистрируются примерно с одинаковой частотой, как в периоды спокойного состояния ионосферы, так и при ее возмущениях. Такие зависимости  $A(h)$  ранее были изучены затненным методом в средних широтах и экваториальной области. Они соответствуют  $E_S$  структурам обусловленным ветровым сдвигом, когда на близких высотах ветер имеет почти противоположное направление [24, 25]. Для третьего типа зависимости  $A(h)$ , отмеченной на рис. 1 характерно расположение в области известного  $E$  слоя при  $h \approx 110$ – $125$  км. В таких зависимостях всегда наблюдаются частые глубокие замирания и сильные увеличения уровня  $A(h)$ , типичные для интерференции двух выделенных лучевых линий. Толщина таких структур  $h \approx 15$ – $20$  км.

Определение нижней границы  $E_S$  образований по данным изменений  $A(h)$  затруднительно и может давать заниженные, нереальные значения минимальной высоты  $h_{\min}$ . Это связано с тем, что расположение условного центра  $E_S$  облачных, сильно неоднородных спорадических структур может не совпадать с областью перигея лучевой линии радиоволн. В теории затненного радиопросвечивания ионосферы показано, что если центр

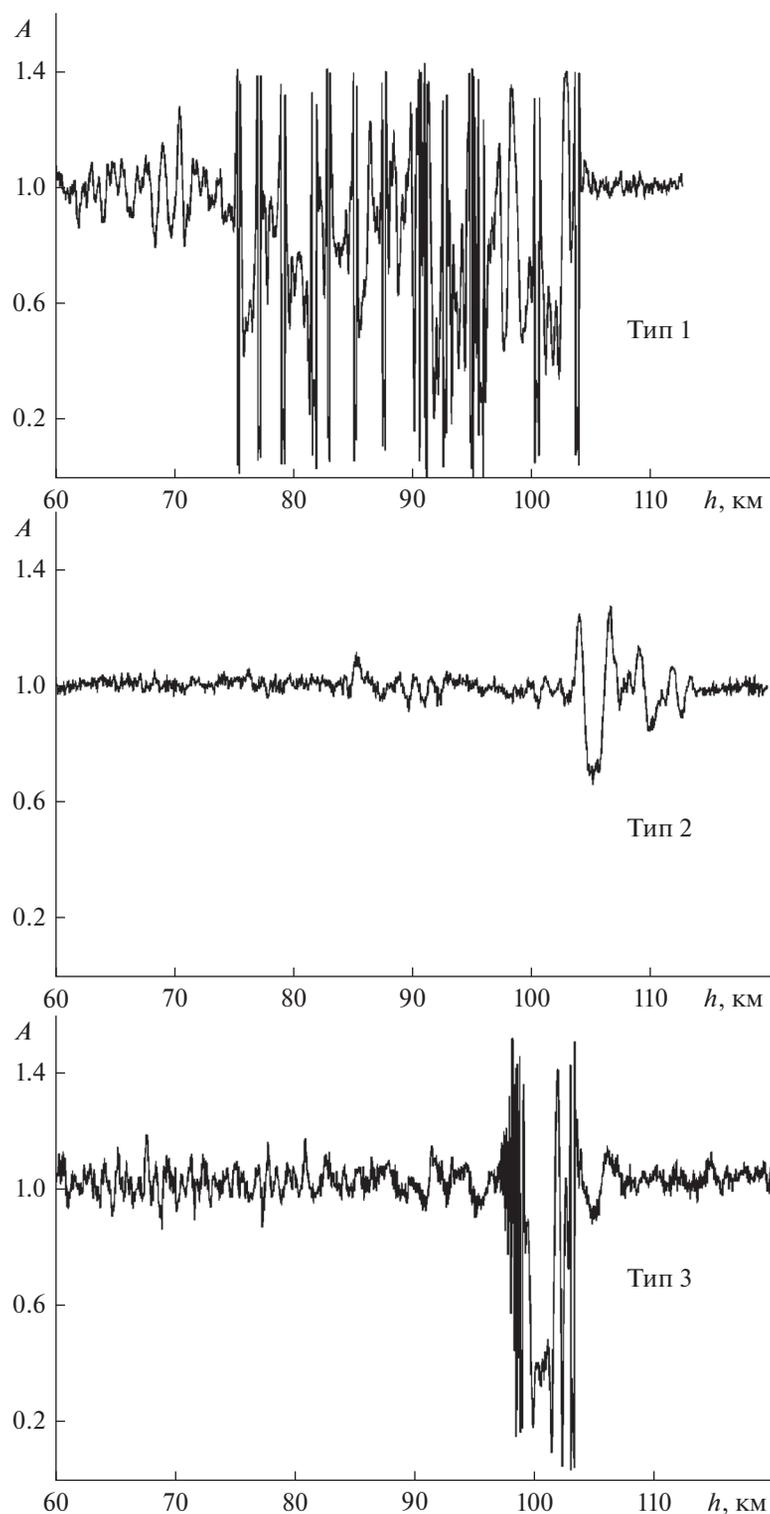


Рис. 1. Типичные изменения амплитуды сигналов, обусловленные тремя типами спорадических образований.

неоднородных облачных  $E_S$  структур плазмы расположен на расстоянии  $\pm L$  от перигея лучевой линии, то кажущаяся высота  $h_{\min}$  будет занижена на  $\Delta h$ , которая определяется приближенным соотношением  $L^2 \approx 2a \Delta h$ , где  $a$  – радиус Земли. Так

если центр  $E_S$  структуры отстоит на лучевой линии радиоволн от точки перигея на  $L = 500$  км, то кажущаяся высота  $h_{\min}$  будет заниженной на 20 км. Необходимо отметить также, что часто регистрируются ситуации, когда одновременно присут-

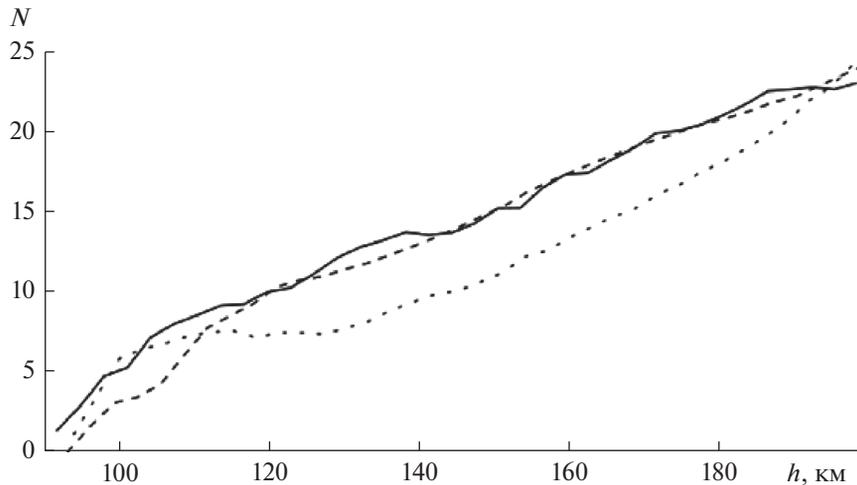


Рис. 2. Примеры зависимостей  $N(h)$  при спокойном состоянии ионосферы и отсутствии проявлений  $E_S$  структур.

ствуют на различных высотах изменения  $A(h)$  разных типов. По нашим данным полярная ионосфера почти всегда содержит  $E_S$  образования разной интенсивности и редко отсутствуют признаки влияния спорадических структур. В средних широтах и экваториальной области по данным [26–28]  $E_S$  структуры проявляются реже и имеют другие признаки.

## 2. ВЫСОТНЫЙ ПРОФИЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Профиль  $N(h)$  определялся дисперсионным методом, когда изменения приведенной разности фаз двух сигналов позволяют определять зависимость интегральной электронной концентрации на лучевой линии от высоты точки перигея  $J(h)$ . Эта зависимость регистрировалась при  $h > 120$  км с частотой 1 Гц. Далее делалось существенное предположение, что плазма ионосферы Арктики имеет хотя бы приближенную локальную сферическую симметрию и из зависимости  $J(h)$  с помощью преобразования Абея можно определить профиль  $N(h)$  в районе перигея лучевой линии радиоволн.

Приведем сведения о зависимостях  $N(h)$ , полученных в спокойные сутки 19, 20 и 21.VI.2015 г., когда по данным [sec.noaa.gov](http://sec.noaa.gov); [wdc.kyoto](http://wdc.kyoto) еще не было магнитной бури и вспышек солнечной активности. Электронную концентрацию будем выражать в единицах  $10^4 \text{ см}^{-3}$ . На рис. 2 представлены примеры профилей  $N(h)$  типичные для спокойной ионосферы, когда присутствие по амплитудным данным слабых  $E_S$  структур не проявляется. Здесь данные, полученные 19.VII в 12:33 UT на широте  $68.5^\circ$ , долготе  $78.5^\circ$  (сплошная линия)

и в 20:58 UT на широте  $68.8^\circ$ , долготе  $-41.4^\circ$  (пунктир) и также 20.VI в 04:58 UT на широте  $70.2^\circ$ , долготе  $-8.7$  (показано точками). Видно, что  $N(h)$  в пределах ошибок измерений одинаковы, хотя долгота районов отличается сильно. Рис. 3 демонстрирует зависимости  $N(h)$  при  $E_S$  структурах, дающих заметное увеличение электронной концентрации на высотах 100–120 км. Сплошная линия здесь соответствует измерениям 21.VI в 03:18 UT на широте  $83.6^\circ$ , долготе  $-90^\circ$ , когда зарегистрировано значительное увеличение  $N$  при  $h = 105\text{--}115$  км. Зависимости  $N(h)$ , показанные пунктиром и точками, получены 19.VI в 15:25 UT на широте  $79^\circ$ , долготе  $87^\circ$  и в 17:11 UT на широте  $69^\circ$ , долготе  $160^\circ$ . На них также проявляется влияние  $E_S$  структур на высотах 105 и 115 км. Изменчивость профилей  $N(h)$  даже в относительно спокойных сутках может быть велика. Зависимости  $N(h)$ , зарегистрированные в определенном районе через несколько минут, отличаются сильно, поэтому не удается выявить ясной зависимости  $N(h)$  от угла возвышения Солнца. Статистический анализ электронной концентрации, позволяет найти гистограммы распределений  $N(h)$  для нескольких высот. На рис. 4 представлены гистограммы распределений  $N$ , полученные по данным 124 радиопросвечиваний 19, 20 и 21.VI.2015 г., при спокойном состоянии ионосферы, когда еще не было солнечных рентгеновских вспышек и магнитной бури. Гистограммы найдены для высот 100, 130, 160 и 190 км, указанных у соответствующих распределений. Из гистограмм следует, что при  $h = 100$  км в 50% сеансов зондирования ионосферы  $N = 6 \pm 2$ , а для  $h = 130$  км в 54% радиопросвечиваний получено  $N = 11 \pm 3$ . Для больших высот при  $h = 160$  км электронная концентрация в 51% сеансов может варьироваться в пределах

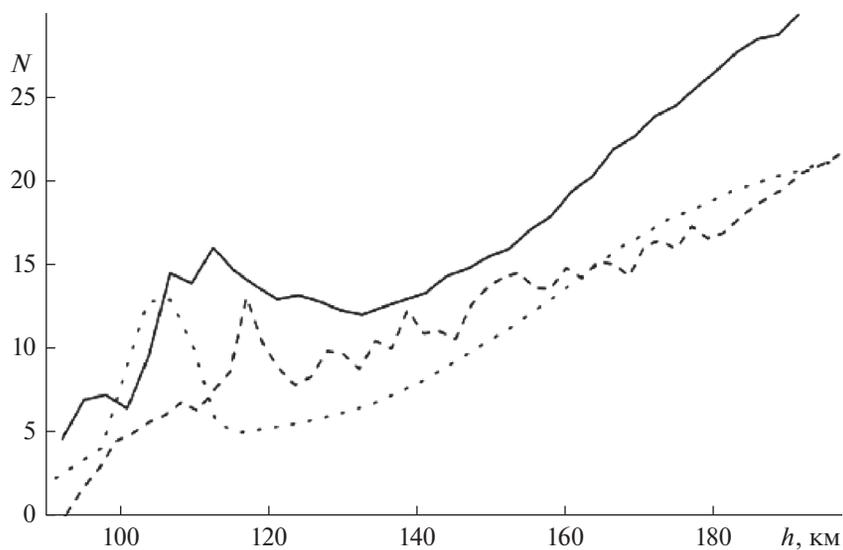


Рис. 3. Высотные профили электронной концентрации при слабом влиянии  $E_S$  образований.

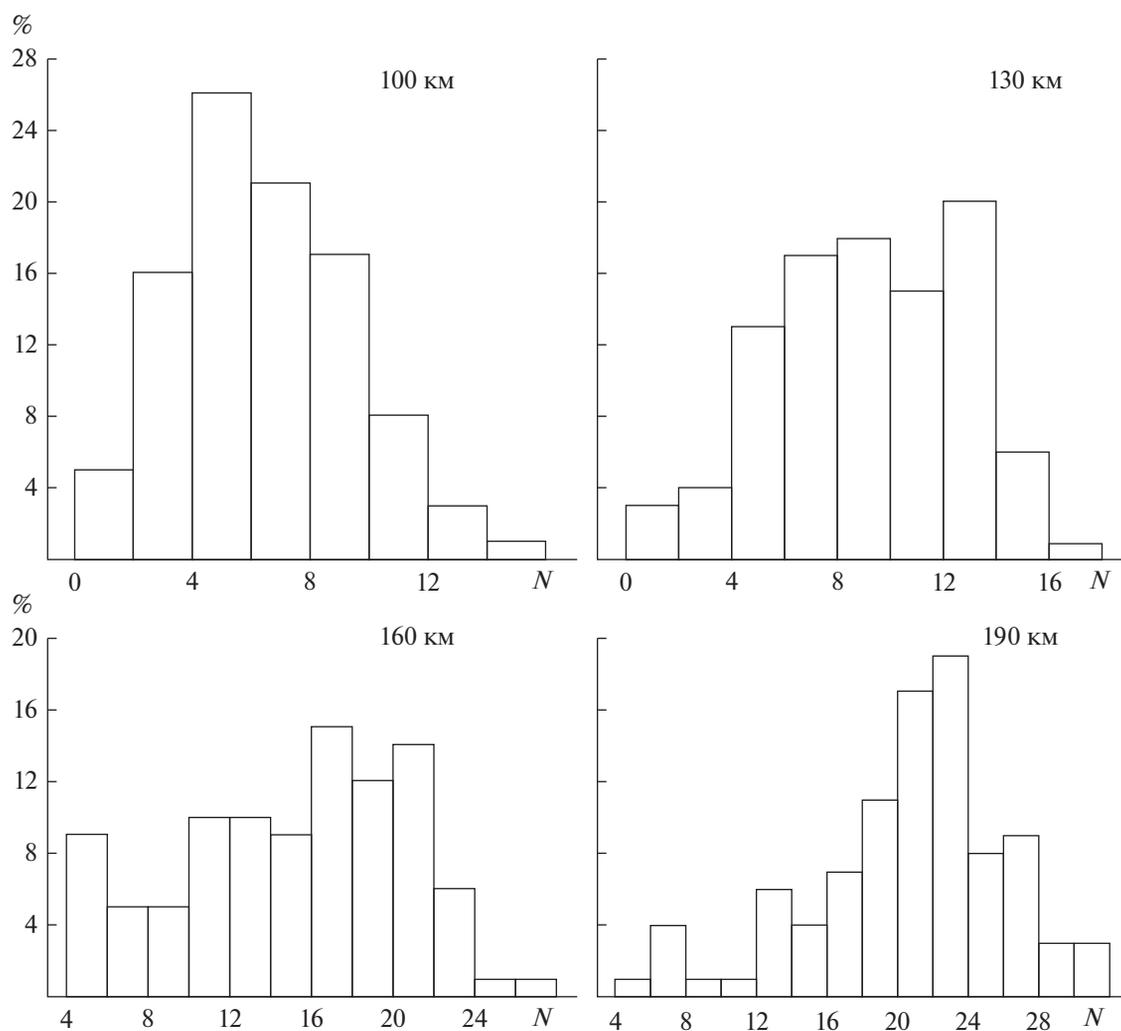


Рис. 4. Гистограммы распределений электронной концентрации для четырех значений высоты.

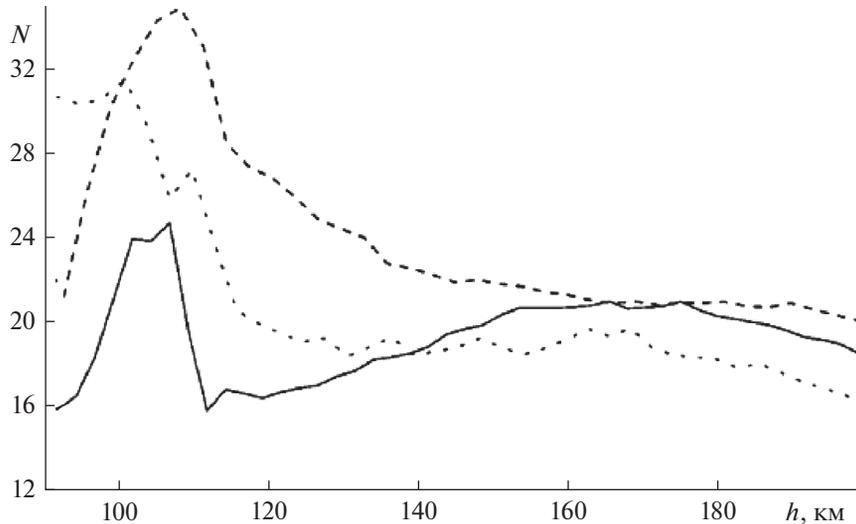


Рис. 5. Примеры зависимостей электронной концентрации от высоты во время солнечной рентгеновской вспышки 22.VI.

$18 \pm 4$ , а для высоты  $h = 190$  км в 57% случаев  $N = 23 \pm 4$ . В 90% сеансов зондирования ионосферы наблюдались следующие пределы вариаций электронной концентрации. При  $h = 100$  км  $N_{\min} = 2-4$ ,  $N_{\max} = 10-12$ , а для  $h = 130$  км  $N_{\min} = 2-4$ ,  $N_{\max} = 14-16$ . В нижней ионосфере, в области обычного расположения  $E$ -слоя, электронная концентрация варьируется примерно в 4 раза. Выше этой области при  $h = 160$  км  $N_{\min} = 6-8$ ,  $N_{\max} = 22-24$  и для  $h = 190$  км  $N_{\min} = 12-14$ ,  $N_{\max} = 26-28$  электронная концентрация изменяется в 2 раза. Отметим сильное различие гистограмм для  $h = 100$  и  $h = 190$  км, обусловленное разными ионизирующими факторами, действующими на этих высотах.

Рассмотрим влияние солнечной рентгеновской вспышки и магнитной бури на ионосферу. До 17:20 UT 22.VI ионосфера была спокойной, а профили  $N(h)$  примерно такими, как представленные на рис. 2 и 3, 22.VI в 17:23 UT зарегистрировано начало мощной рентгеновской солнечной вспышки, которая закончилась в 20:54. В этот период на высотах 95–105 км произошло сильное увеличение электронной концентрации. На рис. 5 представлены примеры зависимостей  $N(h)$ , полученные во время рентгеновской вспышки. Сплошная линия соответствует  $N(h)$  для 19:26 UT, широты  $73^\circ$ , долготы  $-148^\circ$ , пунктир — 20:52 UT, широты  $68^\circ$ , долготы  $121^\circ$ , а точками показана  $N(h)$  для 19:01 UT, широты  $67^\circ$ , долготы  $-169^\circ$ . Видно, что сильное увеличение  $N$  при  $h = 85-105$  км наблюдалось во всей полярной области. На высоте 100 км электронная концентрация достигала 19–31 единиц, а в нескольких случаях при  $h \approx 95$  км

наблюдался срыв связи на трассах спутник-спутник. Если сравнить эти значения  $N$  с наиболее вероятным уровнем электронной концентрации  $N = 6$  для  $h = 100$  км при спокойном состоянии ионосферы, то обнаружим, что влияние рентгеновского излучения привело на этой высоте к увеличению  $N$  в 4–5 раз. Такое увеличение электронной концентрации зарегистрировано в разных районах Арктики. Существенно, что на высотах 160 и 190 км концентрация  $N$  оставалась почти такой же, как и в спокойные сутки.

В период сильного увеличения электронной концентрации ионосферы с 17:22 до 20:54 UT было зарегистрировано несколько очень сильных изменений амплитуды сигналов первого и третьего типов, а также наблюдались сеансы радиопросвечивания с наложением  $A(h)$  этих типов. В 17:22 почти одновременно получено две таких зависимостей  $A(h)$  для разных районов Арктики, что свидетельствует о почти одновременном возбуждении неоднородностей ионосферы. Существенно, что в краткие периоды между сильными увеличениями  $N$  и изменениями  $A$  ионосфера становится спокойной —  $A(h)$  не претерпевает изменений, регистрируется постоянный уровень сигнала на трассе спутник — спутник, а 23, 24 и 25.VI. была главная фаза магнитной бури, когда индекс  $Dst$  и направление межпланетного магнитного поля резко изменялись. Отмечается, что геомагнитный индекс  $K_p$  в эти сутки изменялся сильно и был в пределах 5–8. Вторая рентгеновская вспышка произошла 25.VI. (начало — 08:02, окончание 12:35 UT). Ее начальный этап был зарегистрирован в сеансе радиопросвечивания 08:08 UT сильным увеличением электронной концентрации до 19 и 27 единиц при  $h = 100-105$  км. Далее в 14:16 и

14:17 UT зарегистрированы сильные увеличения  $N$  до 34 единиц при  $h = 100\text{--}105$  км и изменения амплитуды  $A(h)$  на высотах 80–120 км. Примерно такая же ситуация повторилась в 16:07, где четко выражено сильное изменение ионосферы. В течение 23–26.VI. в радиоданных регистрируется беспорядочное чередование и сильных и слабых изменений  $N$  и  $A$ , так что для этих суток выделить преимущественное влияние различных факторов не удастся.

Трудно оценить ошибки определений  $N$  из-за влияния двух неустранимых причин. Первая – обусловлена отличием реальной ионосферы от модели сферически симметричной среды, а вторая – связана с временной изменчивостью  $N(t)$  электронной концентрацией верхней ионосферы во время измерений  $N(h)$  нижней ионосферы. По этим причинам определения  $N(h)$  для спокойной ионосферы при  $h \approx 90$  км можно считать невозможными, а при  $h > 100$  км ошибки  $N$  могут достигать  $\pm 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Во время сильной рентгеновской вспышки возможно определение зависимости  $N(h)$  даже при  $h \approx 80\text{--}95$  км.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиозатменный метод сначала был предложен и реализован для исследований атмосфер и ионосфер Марса и Венеры. Он доказал высокую эффективность с помощью первых российских спутников *Венера-9* и *Венера-10* [29, 30]. Затем последовали пробные радиозатменные эксперименты, осуществленные на подходящих не специализированных земных трассах станция *МИР* – геостационарный спутник, которые дали сведения о чувствительности радиосигналов к влиянию различных характеристик ионосферы и атмосферы Земли [31, 32]. В результате создания в США, Германии и Тайване специализированных малых исследовательских спутников, принимающих сигналы навигационных спутников GPS, была реализована международная радиозатменная система глобального мониторинга ионосферы и атмосферы Земли.

Результаты многолетних исследований ионосферы районов Арктики наземными средствами недостаточны, а вскрытые закономерности все еще являются предметом дискуссий. Полярная ионосфера высоких широт Арктики недоступна регулярному изучению с использованием наземных средств. Радиозатменный метод исследования ионосферы обширной территории Арктики позволяет регулярно получать большой экспериментальный материал о состоянии этой изменчивой среды. Этот метод зондирования полярной ионосферы, находящийся на начальном этапе развития, дает около шестидесяти вертикальных профилей электронной концентрации  $N(h)$  каждые сутки, что способствует выяснению причин-

но-следственных связей ее быстрой и сильной изменчивости под воздействием различных гелиогеофизических факторов. Наши эксперименты показали, что метод чувствителен к высыпанию из магнитосферы частиц с различным энергетическим спектром и воздействию магнитных бурь и рентгеновских солнечных вспышек. В этой статье довольно условно выделено три типа  $E_S$  образований, основанных и на изменениях  $A(h)$  и на особенностях профилей  $N(h)$ . Существенно, что радиозатменный метод позволяет получать зависимости  $N(h)$  и  $A(h)$  в сильно отличающихся условиях дневной и ночной ионосферы.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 0030-2019-0008.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hajj G.A., Romans L.I.* Ionospheric electron density profiles obtained with the GPS: Results from the GPS/MET experiment // *Radio Sci.* 1998. V. 33. № 1. P. 175.
2. *Кучерявенков А.И., Яковлев О.И., Кучерявенкова И.Л., Самознаев Л.Н.* Закономерности ионосферных изменений частоты и амплитуды радиоволн в затменных экспериментах на трассе спутник-спутник // *Радиотехника и электроника.* 1998. Т. 43. № 8. С. 945.
3. *Schreiner W., Sokolovsky S., Rocken C., Hunt D.* Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data in the ionosphere // *Radio Sci.* 1999. V. 34. № 4. P. 949.
4. *Hajj G.A., Lee L.C., Pi X. et al.* Cosmic GPS ionospheric sensing and space weather // *Terr. Atmos. and Oceanic Sci.* 2000. V. 11. № 1. P. 235.
5. *Hocke K., Igarashi K., Nakamura M. et al.* Global sounding of sporadic E layers by the GPS–MET radio occultation experiment // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2001. V. 63. № 18. P. 1973.
6. *Yakovlev O.I., Matyugov S.S., Anufriev V.A.* Scintillations centimeter waves and atmospheric irregularities from radio occultation data // *Radio Sci.* 2003. V. 38. № 2. <https://doi.org/10.1029/2000RS002546>
7. *Yakowski N., Leitinger R., Angling M.* Radio occultation techniques for probing the ionosphere // *Annals of Geophysics.* 2004. V. 47. № 2/3. P. 1049.
8. *Павельев А.Г., Матюгов С.С., Яковлев О.И.* Спутниковый глобальный мониторинг атмосферы и ионосферы // *Радиотехника и электроника.* 2008. Т. 53. № 9. С. 1081.
9. *Яковлев О.И., Ануфриев В.А., Викерт И., Матюгов С.С.* Возможности радиозатменного мониторинга нижней ионосферы на трассах спутник-спутник // *Радиотехника и электроника.* 2008. Т. 53. № 2. С. 169.
10. *Yakovlev O.I., Wickert J., Pavelyev A.G. et al.* Sporadic structures in equatorial ionosphere as revealed from GPS occultation data // *Acta Astronautica.* 2008. V. 63. № 11–12. P. 1350.
11. *Матюгов С.С., Яковлев О.И., Ануфриев В.А.* Спорадические структуры экваториальной ионосферы

- по данным радиопросвечивания на трассах спутник-спутник // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51. № 3. С. 181.
12. Матюгов С.С., Яковлев О.И., Павельев А.Г. и др. Спорадические образования экваториальной ионосферы по результатам затменного радиопросвечивания на трассах спутники GPS – Formosat // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58. № 4. С. 255.
  13. Deer C.S., Holtet J.A. ed. Polar upper atmosphere. Reidel company. Dordrecht. 1981.
  14. Pavelyev A., Igarashi K., Reigber C. et al. First application of the radioholographic method to wave observations in the upper atmosphere // Radio Sci. 2002. V. 37. № 3. <https://doi.org/10.1029/2000RS002501>
  15. Викерт И., Яковлев О.И., Павельев А.Г. и др. Ионосферные флуктуации дециметровых радиоволн на трассах спутник-спутник // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 10. С. 1184.
  16. Яковлев О.И., Викерт И., Матюгов С.С., Ануфриев В.А. Флуктуации радиоволн в полярной ионосфере на трассах спутник-спутник при высокой солнечной активности // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 3. С. 185.
  17. Яковлев О.И., Матюгов С.С., Ануфриев В.А. Нижняя полярная ионосфера во время солнечной вспышки по данным радиопросвечивания на трассах спутник-спутник // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 3. С. 181.
  18. Яковлев О.И., Матюгов С.С., Ануфриев В.А. Спорадические структуры и мелкомасштабная неоднородность ночной полярной ионосферы в период сильной солнечной активности по данным радиопросвечивания // Космич. исслед. 2009. Т. 47. № 4. С. 291.
  19. Yakovlev O.I., Wickert J. Pavelyev A.G. et al. Results of radio occultation measurement of polar ionosphere at satellite paths during strong flare solar activity // Acta Astronautica. 2010. V. 67. № 3–4. P. 315.
  20. Foelsche U., Kirchengast G., Steiner A. Atmosphere and Climate studies by occultation methods / Eds. Springer. Berlin. 2006.
  21. Steiner A., Pirscher B., Foelsche U., Kirchengast G., New horizons in occultation research / Eds. Springer. Berlin. 2009.
  22. Liou Y.A., Pavelyev A.G., Matyugov S.S. et al. Radio occultation method for remote sensing of the atmosphere and ionosphere. IntechOpen. 2010. <https://doi.org/10.5772/46148>
  23. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли. Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: Либроком, 2010.
  24. Whitehead J.D. The formation of the sporadic E layer in the temperature zones // J. Atmos Terr. Phys. 1961. V. 20. P. 49–58. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(61\)90097-6](https://doi.org/10.1016/0021-9169(61)90097-6)
  25. Carrasco A.J., Batista I.S., Abdu M.A. Simulation of the sporadic E layer response to prereversal associated evening vertical electric field // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A06324. <https://doi.org/10.1029/2006JA012143>
  26. Zeng Z., Sokolovskiy S. Effect of sporadic E cloud on GPS radio occultation signal // Geophys. Res. Lett. 2010. V.37. L. 18817. <https://doi.org/10.1029/2010GL044561>
  27. Arras C., Wickert J. Estimation of ionospheric sporadic E intensities from GPS radio occultation measurements // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2018. V. 171. P. 60.
  28. Wen-Hao Yeh, Cheng-Yung Huang, Tung-Yuan Hsiao et al. Amplitude morphology of GPS radio occultation data for sporadic E layers // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A11304. <https://doi.org/10.1029/2012JA017875>
  29. Kolosov M.A., Yakovlev O.I., Efimov A.I. et al. Radio occultation of the venusian atmosphere and bistatic radio-location of the surface of Venus using the Venera-9 and Venera-10 satellites // Radio Sci. 1979. V. 14. № 1. P. 163.
  30. Колосов М.А., Яковлев О.И., Трусов Б.П. и др. О радиопросвечивании атмосферы Венеры с помощью спутников Венера-9 и Венера-10 // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21. № 8. С. 1585.
  31. Яковлев О.И., Гришмановский В.А., Елисеев С.Д. и др. Радиопросвечивание атмосферы Земли с помощью двух спутников // Доклады академии наук СССР. 1990. Т. 315. № 1. С. 101.
  32. Елисеев С.Д., Яковлев О.И. Радиопросвечивание атмосферы Земли в диапазоне миллиметровых радиоволн // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 1. С. 3.

УДК 629.78

## ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНОГО КЛАССИФИКАТОРА ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

© 2021 г. Е. А. Павлова<sup>1</sup> \*, М. В. Захваткин<sup>1</sup>, А. И. Стрельцов<sup>1</sup>, В. А. Воропаев<sup>1</sup>, Л. В. Еленин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

\*elena312@gmail.com

Поступила в редакцию 08.04.2020 г.

После доработки 25.04.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

В статье обобщен практический опыт выполнения работ по предотвращению опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве (ОКП), включающий математическую постановку задачи расчета вероятности опасного сближения, работы по обнаружению потенциально опасных астероидов и общие принципы выявления опасных сближений космических объектов. Рассмотрены подходы к формированию единого классификатора опасных ситуаций в ОКП. Представлено описание составных частей классификатора в форме отдельных блоков.

DOI: 10.31857/S0023420621020084

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве (ОКП) – важный элемент при реализации целевого назначения осуществляемых космических миссий.

Интенсивное использование околоземного космоса и неразрывно связанный с этим рост числа объектов космического мусора приводит к неизбежным процессам засорения ОКП, и, как следствие, создает предпосылки к возникновению различного рода опасных ситуаций, нуждающихся в своевременном выявлении и предотвращении.

В истории зафиксированы случаи возникновения опасных ситуаций различного рода. К примеру, 10.11.2009 года один из спутников низкоорбитальной системы связи *Iridium 33* столкнулся с неработающим российским космическим аппаратом *Космос-2251*. В результате этого столкновения образовалось долгоживущее облако фрагментов космического мусора [5].

Другое событие, произошедшее 15.11.2013 года в районе Челябинска, показало, что при входе в атмосферу над густонаселенными районами Земли даже небольшого объекта (размером 15–20 м), возможны серьезные последствия для населения в виде увечий от воздействия ударной волны, причинение ущерба постройкам, а также возникновение паники из-за необъявленного события, внешне сходного с техногенной аварией либо применением ядерного оружия.

Особенностью техногенного засорения ОКП является то, что наиболее плотно объекты космического мусора локализованы в области рабочих орбит функционирующих космических аппаратов. Объекты космического мусора, перемещаясь в пределах данных орбит в разных направлениях, создают реальную опасность столкновения с действующими космическими аппаратами, пилотируемыми кораблями и *Международной космической станцией*.

В настоящее время в Российской Федерации не существует единого классификатора видов, критериев опасности, методов выявления и прогнозирования опасных ситуаций в ОКП. Практический опыт обеспечения безопасности космических полетов диктует необходимость разработки “единого формата” общения участников космической деятельности.

Для успешной организации безопасности космической деятельности в ОКП, направленной, в том числе, на предотвращение опасных ситуаций, важна систематизация возможных событий, которые могут возникнуть в околоземном космосе. По мнению авторов, упорядоченное представление о полном спектре возможных космических опасностей, способных нанести вред космической деятельности, позволит рассчитывать на появление и эффективное применение методов их парирования.

## ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В ОКП

Практические работы по анализу ситуационной обстановки в высокоорбитальной области ОКП более пятнадцати лет проводятся в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН – головной академической организации по космическому мусору [6]. Начиная с 2011 года функционирует Сегмент мониторинга опасных ситуаций в области геостационарных, высокоэллиптических и средневысоких орбит (далее – Сегмент) Автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП), созданной Госкорпорацией по космической деятельности “Роскосмос” совместно с Российской академией наук.

Сегмент предназначен для автоматизированного сбора, предварительной обработки и передачи в главный информационно-аналитический центр (ГИАЦ) системы первичной информации о событиях в ОКП, полученной от оптико-электронных средств мониторинга космического пространства. Методы и средства решения задач Сегмента направлены на обеспечение безопасности полетов т.н. “защищаемых” высокоорбитальных космических аппаратов Роскосмоса, состоящей из орбитальных группировок *ГЛОНАСС*, *Экспресс*, *Ямал*, *Электро*, *Луч*, *Спектр*. Применение специальных математических алгоритмов и современных технических решений позволило создать аппаратно-программные комплексы, обеспечивающие решение задач централизованного планирования работы оптических телескопов, получения и первичной обработки измерительной информации, прогнозирования траекторий движения космических объектов (КО), выявления опасных ситуаций и оперативного доведения информации до ГИАЦ АСПОС ОКП в АО “ЦНИИмаш”.

К настоящему времени база данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, хранящая первичную измерительную и баллистическую информацию, содержит записи о более чем десяти тысячах высокоорбитальных космических объектах, сопровождаемых Комплексом специализированных оптико-электронных средств АСПОС ОКП, средствами Международной сети оптических телескопов (МСОТ), координируемой ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [9], телескопами учреждений РАН, обсерваторий-партнеров и предприятий промышленности. Ежегодный прирост числа таких объектов в базе данных отражает динамику техногенной засоренности ОКП.

Практическими основами для проведения комплексной работы по систематизации опасных ситуаций в ОКП служат наработки специалистов

ИПМ в области применения специализированных методик выявления опасных сближений, решения задач оценки вероятности столкновения космических объектов и обнаружения потенциально опасных астероидов.

Далее авторами рассматриваются общие принципы решения таких задач.

### *Принципы выявления опасных сближений космических объектов*

Одной из ключевых задач обеспечения безопасности полетов является предупреждение событий опасных сближений функционирующих КА с объектами “риска” – действующими и нефункционирующими аппаратами, разгонными блоками, верхними ступенями ракет-носителей, операционными фрагментами и прочим космическим мусором. Проведение многолетних работ по выявлению опасных сближений позволило специалистам получить необходимый практический опыт, позволяющий сформировать основные принципы получения высокоточных решений данной задачи.

Сближение двух КО в ОКП определяется орбитами объектов с учетом погрешностей (ошибка) определения и прогнозирования параметров движения каждого из них.

Выявление потенциально опасных сближений происходит поэтапно. На первом этапе определяются все события, в которых пары КО при движении по своим прогнозируемым траекториям на интересующем интервале времени сближаются на расстоянии менее порогового значения. К примеру, для космических объектов на ВЭО и ГСО устанавливается пороговое значение в 100 км, превышение которого не позволяет классифицировать сближение, как опасное, даже в том случае, если область неопределенности относительного положения КО на момент сближения сопоставима с величиной порога, а характерные размеры сближающихся объектов не превышают 50 м (справедливо для высокоорбитальных КО техногенного происхождения).

Сближения, выявленные на первом этапе, анализируются с использованием предположений о распределении и свойствах распределения ошибок знания параметров орбиты каждого из пары сближающихся КО, спрогнозированных на расчетный момент достижения минимального расстояния между ними. Сближение классифицируется, как потенциально опасное, при превышении пороговых значений вероятности столкновения КО, а также меры расстояния между векторами случайных величин (т.н. “расстояния Махаланобиса”) [3] для кинематических векторов положения КО.

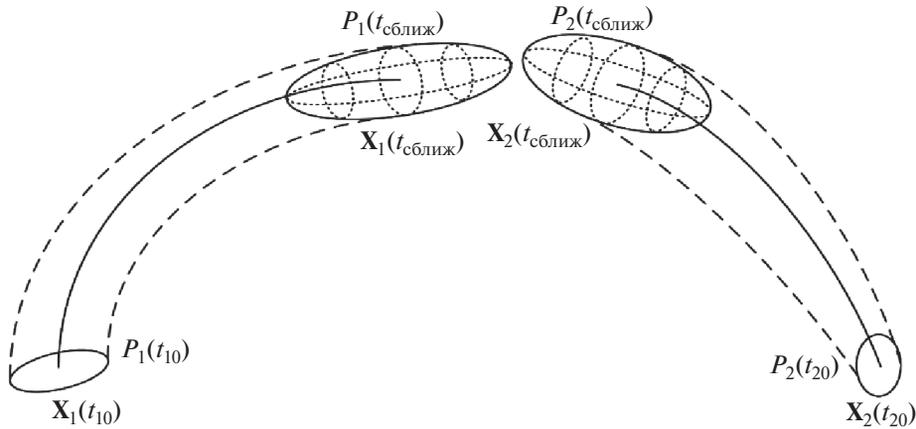


Рис. 1. Графическое представление решения задачи расчета вероятности опасного сближения КО в ОКП.

### Оценка вероятности наступления опасного события

Надежное определение вероятности наступления опасного события необходимо для объективной оценки рисков, востребованной операторами спутниковых группировок, потребителями космических услуг и страховыми компаниями. Кратко опишем один из математических методов получения такой оценки.

Расчетный фазовый вектор положения и скорости (далее – вектор состояния)  $\mathbf{X}_1(t_{10})$  и начальная ковариационная матрица ошибок  $P_1(t_{10})$  одного из сближающихся КО (называемого КО-1) известны на момент времени  $t_{10}$ ; расчетный вектор состояния  $\mathbf{X}_2(t_{20})$  и начальная ковариационная матрица ошибок  $P_2(t_{20})$  КО-2 известны на момент времени  $t_{20}$ . Закон движения (или векторы состояния) и ковариационные матрицы ошибок каждого КО рассчитываются с использованием аналитической или численной модели движения. При помощи метода наименьших квадратов вычисляется момент максимального сближения между двумя КО  $t_{\text{сближ}}$ , относительные векторы состояния  $\mathbf{X}_1(t_{\text{сближ}})$ , и ковариационные матрицы ошибок  $P_1(t_{\text{сближ}})$ ,  $P_2(t_{\text{сближ}})$ .

На рис. 1 схематически представлены траектории движения двух КО с эллипсоидами погрешностей определения их текущих координат (как правило, продольная ошибка определения положения больше ошибки в поперечном направлении).

Для определения вероятности столкновения  $P_c$  двух КО при их опасном сближении можно пользоваться формулой (1), выведенной из математического решения, показанного в работе З.Н. Хуторовского [2].

$$P_c = \frac{S \cdot v_{\text{отн}}}{\sqrt{4\pi^2 |\mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2 \mathbf{K}_1^{-1} + \mathbf{K}_1| \cdot (\delta v^T (\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2)^{-1} \delta v)} \cdot \exp(-0.5 \delta \mathbf{r}^T (\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2)^{-1} \delta \mathbf{r}), \quad (1)$$

где:  $\delta \mathbf{r}$ ,  $\delta \mathbf{v}$  – векторы относительного положения и скорости объектов в момент  $t_{\text{мин}}$  их сближения на минимальное расстояние;  $\mathbf{K}_1$ ,  $\mathbf{K}_2$  – ковариационные матрицы ошибок определения положения обоих КО в момент  $t_{\text{мин}}$ ;  $v_{\text{отн}}$  – модуль относительной скорости сближения;  $^{-1, T}$  – знаки обращения и транспонирования матрицы;  $S$  – площадь поперечного сечения области столкновения, величина которой зависит от формы и размера сближающихся объектов. Например, для объектов сферической формы с диаметрами  $d_1$  и  $d_2$  величина площади поперечного сечения области столкновения определяется по формуле (2).

$$S = \frac{\pi(d_1 + d_2)^2}{4}. \quad (2)$$

Формула (1) получена в следующих предположениях:

1. на временном интервале возможного столкновения двух сближающихся КО их относительное движение прямолинейно;
2. скорости обоих объектов известны с малыми относительными ошибками;
3. ошибки определения положения одного из двух сближающихся объектов намного больше их размеров.

Как видно из (1), вероятность столкновения зависит от размеров сближающихся объектов, ковариационных матриц ошибок определения их положения в момент  $t_{\text{мин}}$  и ориентации вектора относительной скорости.

### Обнаружение потенциально опасных астероидов

Практический опыт поиска и обнаружения опасных астероидов в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН насчитывает более десяти лет. Для решения задачи обнаружения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), в том числе, потенциально опас-

ных [10], задействованы широкоугольные оптические телескопы с апертурой 40 см.

Технология поиска АСЗ заключается в следующем. Оптические телескопы, оснащенные фотоприемными устройствами на основе ПЗС-матриц, получают серию снимков участка небесной сферы. Как правило, в течение наблюдательной ночи выполняются до четырех проходов каждой области небесной сферы. За время, прошедшее между первым и последним снимком серии, опорные звезды фона не меняют своего положения, а малые тела Солнечной системы, напротив, успевают сместиться от кадра к кадру. Это движение выявляется специализированными программами обработки изображений. После обнаружения программой движущегося объекта наблюдатель верифицирует кандидата (отсеивая возможные артефакты) и отправляет типовое сообщение на электронный адрес Центра малых планет (ЦМП) Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики (США). В ЦМП проводится сравнение измеренных положений кандидата с предварительно вычисленными координатами уже известных объектов Солнечной системы. Если кандидат не идентифицируется с каталогизированными объектами, он считается новым космическим объектом (астероидом или кометой, в зависимости от типа гелиоцентрической орбиты и наличия кометных признаков в виде газовой оболочки). Для уточнения параметров движения и определения физической природы новых объектов сотрудниками обсерваторий проводятся дополнительные наблюдения по эфемеридам, рассчитанным сервисом ЦМП.

За обнаружением следует построение первичной орбиты и оценка риска его столкновения с Землей. Критерием оценки является минимальное расстояние между орбитами объекта и Земли, составляющая 0.05 а. е. Астероид, соответствующий данному критерию, классифицируется, как “потенциально опасный”.

Астрометрические и фотометрические данные по астероидам, сближающимся с Землей (включая потенциально опасные) хранятся специализированной базе данных ИПМ. Содержимое базы данных обрабатывается прикладными программами, реализующими алгоритмы решения различных статистики и небесной механики в интересах предупреждения и парирования космических угроз.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В целях систематизации опасных событий в околоземном космосе в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН ведется разработка единого классификатора опасных ситуаций в ОКП [7] с использованием

собственных практических наработок и анализа зарубежного опыта [4].

Возрастающая активность участников космической деятельности, в том числе, по развертыванию многоспутниковых орбитальных группировок, увеличение доли частных космических акторов, реализации не апробированных принципов управления космическим движением создает предпосылки для возникновения новых видов опасных ситуаций, возникающих в ОКП. Выявление и парирование новых угроз выходит за рамки технических возможностей действующих систем контроля космического пространства.

Неучтенные опасные ситуации могут представлять серьезную угрозу для действующих космических аппаратов и объектов наземной инфраструктуры. Отдельную опасность представляют объекты естественного происхождения и неконтролируемые объекты космического мусора, входящие в плотные слои земной атмосферы и способные достичь поверхности земли.

Событие в ОКП классифицируется, как “опасная ситуация”, в том случае, если его наступление создает угрозу безопасному выполнению космических операций, препятствует штатному функционированию космических аппаратов и орбитальных систем, подвергает опасности объекты наземной инфраструктуры и население в целом.

К опасным ситуациям авторы относят следующие виды, представленные на рис. 2. Ниже подробно рассматриваются отдельные структурные блоки классификатора.

### *Блок классификатора “Опасные сближения”*

Наиболее распространенным видом опасных ситуаций являются опасные сближения космических объектов. Данный вид опасной ситуации возникает в результате взаимного движения космических объектов в диапазоне относительных скоростей от метров в секунду (для орбит близким к компланарным) до нескольких километров в секунду (в случае сближения КО на существенно различных орбитах). Как правило, опасность такой ситуации заключается в незнании истинных значений погрешностей определения параметров орбиты каждого из сближающихся объектов, приводящего к разнице между фактическим и расчетным значениями минимального расстояния между объектами от сотен метров до двух километров в большую или меньшую сторону. На практике применяются два пороговых значения оценки сближений на уровне 10 и 5 км; минимальный уровень вероятности столкновения при этом полагается равным  $10^{-4}$  [1]. События сближений, прогнозируемые на расстоянии десяти и более километров, не считаются опасными, и в большинстве случаев игнорируются операторами КА.



Рис. 2. Общая схема классификации опасных событий в ОКП.



Рис. 3. Классификация опасных сближений.

При решении задачи определения траектории движения космического объекта в гравитационном поле Земли он рассматривается в качестве материальной точки с известным отношением площади к массе (ОПМ). При этом учитываются возмущения от несферичности гравитационного поля, влияния светового давления, сопротивления верхних слоев атмосферы, притяжения Луны и Солнца. На практике ОПМ является переменной величиной, имеющей сложный, трудно прогнозируемый характер изменения во времени и постоянно уточняется наблюдениями за самим объектом.

Подробную классификацию опасных сближений можно представить в виде блока объектов, событий и связей между ними (рис. 3).

К примеру, событие инспекции (преднамеренное маневрирование вблизи космического аппарата (как правило, принадлежащего другому государству) с целью выявления его технических характеристик, контроля активности в радиодиапазоне или противодействия выполнению им целевых задач) классифицируется, как продолжительное (долговременное сближение).

В свою очередь, продолжительное (долговременное сближение) относится к классу сближения космического аппарата с космическим аппаратом. Данный класс относится к наблюдаемому (поскольку речь идет об активных аппаратах, орбиты которых уточняются радиотехническими измерениями) подклассу прогнозируемых опасных сближений.

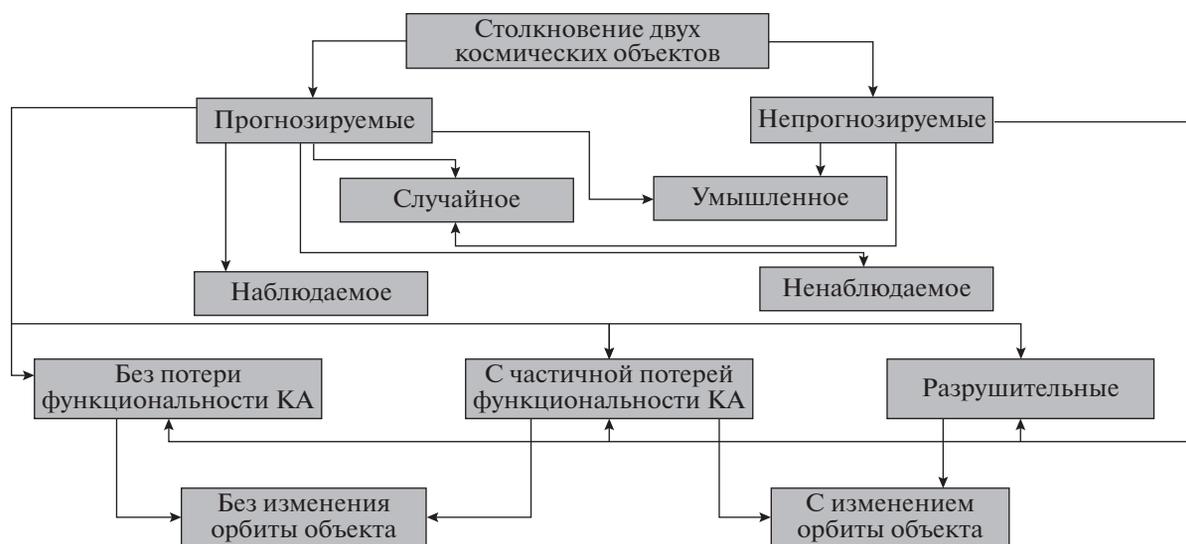


Рис. 4. Классификация столкновения двух космических объектов в ОКП.

Отнесение событий к прогнозируемым и непрогнозируемым зависит от возможности априорного определения параметров движения обоих объектов, участвующих в сближении. Наблюдаемость сближения зависит от возможности применения методов оптического, радиолокационного, лазерного или радиотехнического контроля КО (к примеру, технические ограничения существующих возможностей комплексов наземных электронно-оптических систем могут препятствовать регулярному сопровождению малоразмерных КА на высоких орбитах). Управляемость и неуправляемость сближения, в терминологии данного классификатора, определяется наличием конструктивной возможности КА к уклонению от опасного сближения путем проведения коррекции траектории своего орбитального движения.

*Блок классификатора  
“Столкновение двух космических объектов”*

Событие столкновения двух космических объектов, как вид опасной ситуации в космосе, может быть классифицирован при помощи схемы, представленной на рис. 4.

Ключевым фактором, определяющим последствия столкновения, является суммарная кинетическая энергия каждого из объектов, пропорциональная квадрату относительной скорости и массе конструкции КА, попадающей в область разрушения.

*Блок классификатора “Разрушение космического аппарата либо космического объекта”*

Данный вид опасной ситуации может произойти в следствие разрушения конструктива КА

или разгонного блока из-за детонации остатков топлива в баках, взрыва шар-баллонов, содержащих газ для наддува и работы системы ориентации, электролита в аккумуляторных батареях (рис. 5).

Наиболее вероятными причинами возникновения таких ситуаций являются: нарушение правил пассивации аппарата, деградация конструктива под действием космической среды, тепловой нагрев от сопротивления атмосферы, разряд статического электричества, внутренние химические реакции либо механическое разрушение элементов конструкции для быстровращающегося КА.

*Блок классификатора  
“Неуправляемое возвращение в атмосферу”*

Данный вид опасной ситуации описывает последствия вхождения космического объекта в плотные слои атмосферы Земли с возможным достижением ее поверхности.

Термин “неуправляемый” подразумевает отсутствие возможности воздействия на объект внутренних реактивных или аэродинамических сил с целью приведения его в заданный район земной/океанской поверхности.

Классификация события неуправляемого возвращения в атмосферу Земли представлена на рис. 6.

Рассматриваемый вид опасной ситуации подразделяется на наблюдаемый и ненаблюдаемый (средствами контроля ОКП). Предсказуемость неуправляемого возвращения в атмосферу Земли аппарата на низкой околоземной или высокоэллиптической орбите с низким перигеем зависит,

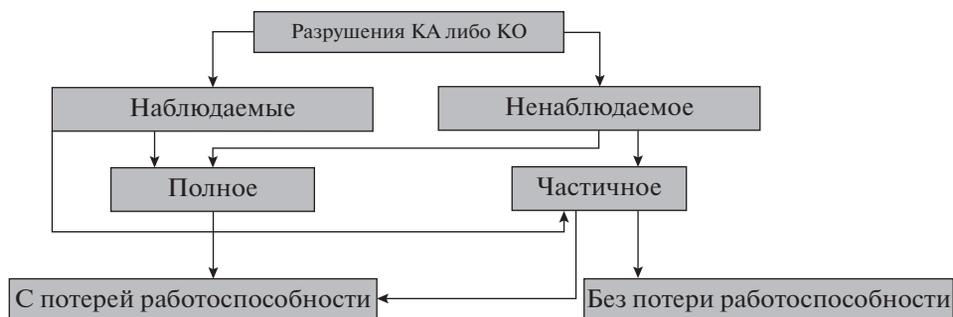


Рис. 5. Классификация разрушения космического аппарата либо космического объекта в ОКП.

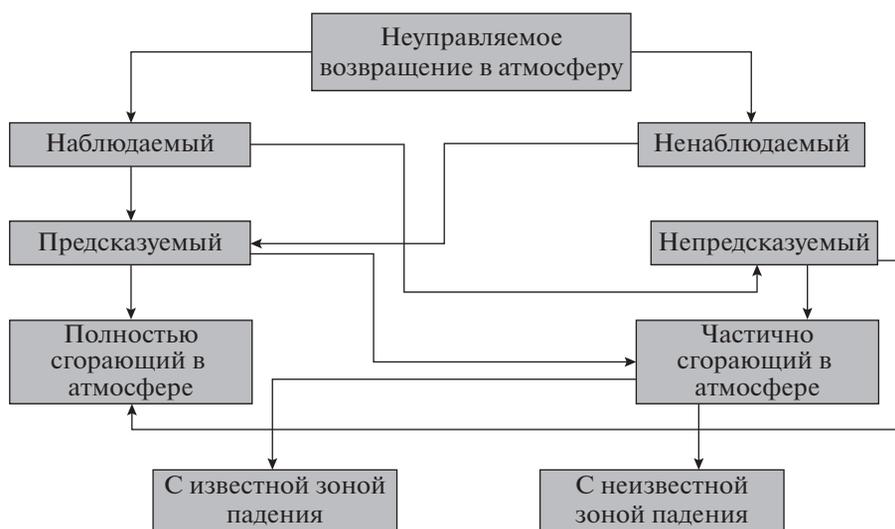


Рис. 6. Классификация неуправляемого возвращения в атмосферу Земли.

среди прочих факторов, от степени деградации систем служебного борта КА.

Во избежание такого сценария операторами космических аппаратов проводятся заключительные операции по их управляемому возвращению атмосфере (для посадки или затопления) либо уходу на орбиту “захоронения” с большим сроком баллистического существования.

В условиях воздействия существенных негравитационных возмущений, вызванных аэродинамическим напором, представляется невозможным моменты координаты падения КО точнее 5–10% от оставшегося значения.

#### *Блок классификатора “Неблагоприятное воздействие факторов космической среды”*

Одним из важных факторов, определяющих обстоятельства возникновения опасных ситуаций в ОКП, являются параметры космической погоды, т.е. совокупности явлений, происходящих в верх-

них слоях земной атмосферы, ионосфере и магнитосфере Земли. Космическая погода влияет на события в ОКП путем воздействия солнечного излучения (прежде всего, в ультрафиолетовом диапазоне спектра), высокоэнергичных заряженных частиц солнечного и галактического происхождения. Опасность неблагоприятного воздействия заряженных частиц на бортовые системы низкоорбитального КА многократно усиливается в ходе его пролета над районом Южной Атлантической магнитной аномалии. Влияние ультрафиолетового излучения Солнца на ионосферу Земли приводит к изменению плотности газовой среды вдоль траектории полета КА, существенно влияя на точность прогнозирования его движения.

Классификация неблагоприятного воздействия факторов космической среды представлена на рис. 7.

Попадание тяжелой заряженной частицы может вызвать нарушение работы бортовых систем КА. Воздействие атомарного кислорода и ультра-



Рис. 7. Классификация неблагоприятного воздействия факторов космической среды.

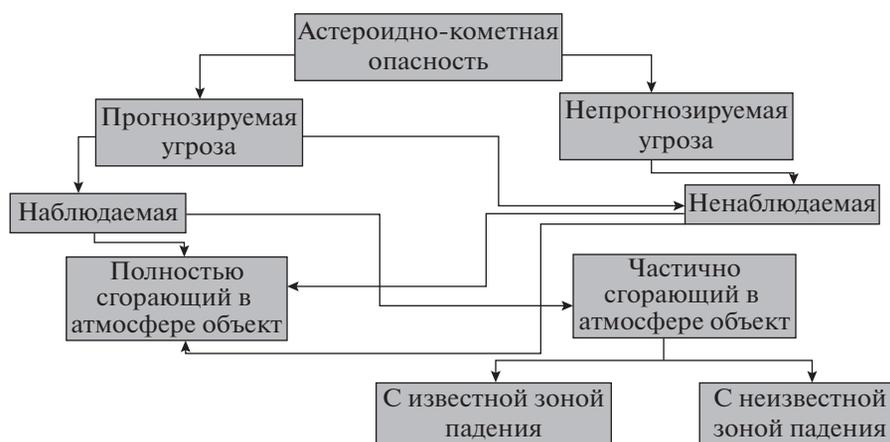


Рис. 8. Базовая классификация угрозы АКО.

фиолетового излучения приводит к деградации фотопреобразователей (обугливание) панелей солнечных батарей, вызывает потемнение лакокрасочных покрытий, расслоение тонкопленочной экранно-вакуумной теплоизоляции, снижение оптических характеристик иллюминаторов и различных бортовых приборов.

В течение своего полета космический аппарат может попадать в области микрометеоритных потоков, частицы которых характеризуются скоростями от 11.5 до 72 км/с. Микрометеоритные частицы, наряду с фрагментами космического мусора, представляют опасность для функционирующих космических аппаратов.

*Блок классификатора  
“Астероидно-кометная опасность”*

В качестве отдельного вида космических угроз следует отметить астероидно-кометную опасность (АКО) столкновения малого тела (астероида или кометы) с Землей. В настоящее время не существует средств активного парирования таких угроз. Для оценки риска АКО используется Туринская шкала [8]. Базовая классификация данного вида угроз представлена на рис. 8.

Опасные события, вызванные АКО можно подразделить на прогнозируемые и непрогнозируемые (в зависимости от достоверности баллистического прогноза движения, интервала упреждения), наблюдаемые и ненаблюдаемые (в зависимости от контроля оптическими или радиолокационными средствами наблюдения). Объекты, полностью сгорающие в тропосфере Земли несут угрозу поражения ударной волной, а частично сгорающие в атмосфере можно разделить на объекты с расчетной зоной падения либо с нерасчетной (в зависимости от траектории движения).

Таким образом, при объединении отдельных блоков рассматриваемых опасных ситуаций в ОКП (опасных сближений, столкновений на орбите, событий разрушений, направляемого возвращения в атмосферу Земли, неблагоприятного воздействия факторов космической погоды и астероидно-кометной опасности) в общую схему классификатора возникает цельное представление о возможных космических “происшествиях”.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В статье обосновывается необходимость формирования единого классификатора опасных си-

туаций в ОКП. При формировании такого классификатора широко используется научно-технический задел ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Отмечено разнообразие ситуаций, создающих угрозу космической деятельности. Предложен метод систематизации наиболее распространенных видов опасных событий.

Разработка единого классификатора должна способствовать:

– выявлению случаев, создающих угрозу безопасное проведение космических операций;

– разработке математических, программно-алгоритмических методов и средств прогнозирования опасных ситуаций;

– поиску новых методов контроля и мониторинга околоземного космического пространства;

– разработке мер по предотвращению различных космических угроз;

– расширению научных знаний об объектах и событиях в ближнем космосе.

В перспективе классификатор поможет сформировать методики комплексной оценки рисков возникновения опасных ситуаций, а также выработать критерии для принятия решений по парированию неблагоприятных последствий, учитывающие различные сценарии космической деятельности.

Внедрение принципов единой классификации в технологии управления космическим движением, в условиях постоянно нарастающего уровня техногенной засоренности ближнего космоса и возрастающей интенсивности его использования позволит обеспечить безопасное и устойчивое развитие российской космонавтики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Klinkrad H.* Space Debris. Models and Risk Analysis. Praxis Publishing Ltd: Chichester. 2006.
2. *Khutorovsky Z., Boikov V., Kamensky S.* Direct Method For The Analyses Of Collision Probability Of Artificial Space Objects In LEO: Techniques Results And Applications // 1st European Conference on Space Debris. 1993. V. 1.
3. *Mahalanobis P.* On the generalised distance in statistics // Proceedings of the National Institute of Sciences of India. 1936. V. 2. № 1. P. 49–55.
4. *Rovetto J.* Ontology For Europe's Space Situational Awareness Program // 7th European Conference on Space Debris. ESA SD-05. 2017.
5. *Вениаминов С.С., Червонов А.М.* Космический мусор – угроза человечеству. М.: ИКИ РАН, 2012.
6. *Павлова Е.А., Захваткин М.В., Стрельцов А.И. и др.* Обеспечение безопасности полетов высокоорбитальных космических аппаратов // Всероссийская научная конференция “Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы”. М.: ИКИ РАН. 2019. С. 132.
7. *Павлова Е.А., Стрельцов А.И., Еленин Л.В. и др.* Формирование единого классификатора опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2020. № 23. С. 22.
8. Российская астрономическая сеть. URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1178699>
9. Центр коллективного пользования “Международная сеть телескопов для научных и прикладных задач”. URL: <https://keldysh.ru/ckpmsot/>
10. *Шустов Б.М., Рылова Л.В.* Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2010.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ ДВИЖЕНИЙ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ В РЕЖИМЕ ОДНООСНОЙ МАГНИТНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

© 2021 г. А. И. Игнатов<sup>1, \*</sup>, В. В. Сазонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

\*general\_z@mail.ru

Поступила в редакцию 18.02.2020 г.

После доработки 05.04.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

Исследовано вращательное движение осесимметричного искусственного спутника с постоянным магнитом под действием механического момента, создаваемого влиянием на магнит магнитного поля Земли (МПЗ). Орбитальное движение спутника рассчитывается с учетом нецентральности гравитационного поля Земли и сопротивления атмосферы, собственный магнитный момент спутника параллелен оси симметрии. Построены установившиеся движения спутника, в которых эта ось составляет малый угол с вектором напряженности МПЗ. В качестве модели МПЗ используется модель IGRF. Показана возможность аппроксимации таких движений последовательностью периодических решений модифицированных уравнений движения. Установившиеся движения содержат две базисные частоты — орбитальную и угловую скорость вращения Земли. Периодические решения имеют орбитальный период, но спектр составленной из них аппроксимирующей последовательности практически совпадает со спектром исходного установившегося режима.

**DOI:** 10.31857/S0023420621020035

### 1. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКА

Спутник считаем осесимметричным твердым телом, центр масс которого движется по геоцентрической орбите. На спутнике установлен магнит, создающий постоянный дипольный момент, направленный по оси симметрии спутника. Для записи уравнений движения спутника и представления полученных результатов используется гринвичская система координат  $S_{y_1y_2y_3}$ . Ее начало находится в центре Земли, плоскость  $S_{y_1y_2}$  совпадает с плоскостью экватора, ось  $S_{y_1}$  пересекает гринвичский меридиан, ось  $S_{y_3}$  направлена к Северному полюсу. Полагаем, что эта система вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega_E = (0, 0, \omega_E)$  вокруг оси  $S_{y_3}$ . Здесь и ниже компоненты векторов относятся к системе  $S_{y_1y_2y_3}$ .

Уравнения движения спутника состоят из двух подсистем. Одна подсистема описывает движение центра масс спутника, другая его движение относительно центра масс — вращательное движение. В подсистеме уравнений движения центра масс учитываются нецентральность гравитационного поля Земли и сопротивление атмосферы. Нецентральность поля учитывается с точностью до членов порядка (16.16) включительно в разложении

гравитационного потенциала Земли в ряд по шаровым функциям. Атмосфера считается вращающейся вместе с Землей, ее плотность рассчитывается согласно модели ГОСТ Р 25645.166-2004. Параметры атмосферы и баллистический коэффициент спутника считаются неизменными на всем интервале интегрирования уравнений движения.

Подсистема уравнений вращательного движения образована уравнениями, описывающими теорему об изменении кинетического момента спутника в движении относительно центра масс и уравнениями Пуассона для орта оси симметрии спутника. В уравнениях кинетического момента учитываются гравитационный момент, модельный демпфирующий момент и механический момент, обусловленный взаимодействием магнита спутника с магнитным полем Земли (МПЗ). Формулы этих моментов приведены в [1].

Подсистема уравнений вращательного движения имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{\Omega} + \omega_E \cdot \Omega + k_\Omega \Omega &= \\ &= v(1 - \lambda)(\mathbf{n} \cdot \mathbf{r})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}) + l_0(\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}), \quad (1) \\ \dot{\mathbf{n}} + \omega_E \cdot \mathbf{n} = \Omega \cdot \mathbf{n}, \quad v &= \frac{3\mu_E}{|\mathbf{r}|^5}, \quad \lambda = \frac{I_1}{I_2}. \end{aligned}$$

Здесь точкой обозначено дифференцирование по времени  $t$ , причем векторы дифференцируются относительно системы  $Sy_1y_2y_3$ ;  $I_1$  и  $I_2$  – полярный и экваториальный главные центральные моменты инерции спутника;  $I_2\Omega$  – кинетический момент спутника в его движении вокруг центра масс;  $\mathbf{n}$  – орт оси симметрии спутника;  $\mathbf{r}$  – геоцентрический радиус-вектор центра масс спутника;  $\mathbf{B}$  – магнитная индукция МПЗ в точке с радиус-вектором  $\mathbf{r}$ ;  $I_2I_0$  – дипольный момент магнита спутника,  $\mu_E$  – гравитационный параметр Земли,  $k_\Omega$  – коэффициент демпфирования. Компоненты  $\mathbf{B}$  рассчитываются согласно модели IGRF. Полагаем, что  $I_2I_0|\mathbf{B}| \gg 3\mu_E(I_2 - I_1)|\mathbf{r}|^{-3} > 0$ , т.е. создаваемый магнитом механический момент влияет на движение спутника намного сильнее гравитационного момента.

В программе численного интегрирования уравнений (1) использованы следующие единицы измерения физических величин:  $[t] = 10^3$  с,  $[r] = 10^6$  м,  $[\Omega] = [k_\Omega] = 10^{-3}$  с $^{-1}$ ,  $[\mathbf{B}] =$  Гс,  $[I_0] = 10^{-6}$  с $^{-2}$  Гс $^{-1}$  (в единицах СИ  $[I_0] = 10^{-2}$  А/кг). Параметры уравнений движения:  $\lambda = 0.236$ , баллистический коэффициент спутника  $0.0017$  м $^2$ /кг, параметры модели атмосферы:  $F = 137$ ,  $F_{81} = 117$ ,  $A_p = 10$ . Параметр  $I_0$  варьировался в пределах от 2 до 6 А/кг, параметр  $k_\Omega$  принимал значения: 0 и  $0.00015$  с $^{-1}$ .

Начальные условия движения центра масс спутника заданы на момент 10:13:07 декретного московского времени 5.V.2013. На этот момент элементы орбиты составляли: высота в апогее 575.2 км, высота в перигее 546.8 км, наклонение  $64.87^\circ$ , аргумент широты перигея  $-124.65^\circ$ , долгота восходящего узла (отсчитывается от точки весеннего равноденствия эпохи даты)  $-16.73^\circ$ . Это параметры орбиты спутника *Бион-М № 1*. Начальные условия уравнений (1) задаются в тот же момент времени, что и начальные условия принятой орбиты. Этот момент служит началом отсчета времени – точкой  $t = 0$ .

Ниже рассматриваются движения спутника в режиме одноосной магнитной ориентации [2–4]. В этом режиме ось симметрии спутника совершает малые колебания относительно вектора магнитной индукции МПЗ.

## 2. ПОСТРОЕНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ДВИЖЕНИЙ СПУТНИКА

При  $k_\Omega > 0$  движение спутника в режиме одноосной магнитной ориентации можно искать методом установления – представляющий интерес режим должен быть асимптотически устойчив. В данной работе с этой целью на решениях уравнений (1) минимизировался функционал

$$\Phi = \sum_{s=0}^S |\mathbf{B}(s\tau) \cdot \mathbf{n}(s\tau)|^2, \quad (2)$$

где  $\tau = 5$  мин,  $S = 300$ – $1200$ . Функционал рассматривался в функции начальных условий решения в точке  $t = 0$ , минимизация выполнялась методом Гаусса–Ньютона [5]. Применение этого метода в данной задаче оправдано, поскольку в ориентированном движении функция  $|\mathbf{B}(t) \cdot \mathbf{n}(t)|$  мала. Минимизация функционала (2) позволяет построить режим одноосной магнитной ориентации и в случае  $k_\Omega = 0$ .

Примеры расчетов решений уравнений (1) с начальными условиями экстремалей функционала (2) приведены на рис. 1–3. Решения вычислены на отрезке времени длиной 20 суток при  $I_0 = 4$  А/кг. Решение на рис. 1, 2 получено в случае  $k_\Omega = 0.00015$  с $^{-1}$  и  $S = 288$ . Здесь изображены графики зависимости от времени компонент векторов  $\Omega = (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3)$ ,  $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$  и угла  $\gamma = \arccos(\mathbf{n} \cdot \mathbf{B})$ . Графики построены на отрезках времени  $0 \leq t \leq 3$  сут и  $3 \leq t \leq 20$  сут. Они показывают, что найденное решение можно считать установившимся и описывающим режим одноосной магнитной ориентации. На графиках  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  видны колебания большой амплитуды с периодом 1 сут и колебания малой амплитуды, период которых – примерно половина орбитального периода.

Решение на рис. 3 получено при  $k_\Omega = 0$ ,  $S = 1152$  и  $\mathbf{n} \cdot \Omega = 0$  (в случае  $k_\Omega = 0$  система (1) имеет первый интеграл  $\mathbf{n} \cdot \Omega = \text{const}$ ). Здесь приведены графики компонент вектора  $\Omega$  и угла  $\gamma$ . Это решение первые несколько суток похоже на установившееся, и описывает движение спутника в режиме одноосной магнитной ориентации, но затем оно начинает разрушаться.

## 3. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ДВИЖЕНИЙ

Решение уравнений (1) на рис. 1, 2 выглядит как условно-периодическое. Его частоты были найдены с помощью спектрального анализа, выполнявшегося по следующей схеме [6]. Пусть  $x_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) – значения какой-либо переменной  $x(t)$  исследуемого решения в узлах равномерной временной сетки  $\{t_n\}$ :  $x_n = x(t_n)$ . Во всех рассмотренных ниже примерах шаг сетки  $h = t_{n+1} - t_n = 16$  с. Периодограммой называется функция  $I(f)$ , рассматриваемая на отрезке  $0 \leq f \leq F = (2h)^{-1}$ , и определенная соотношениями

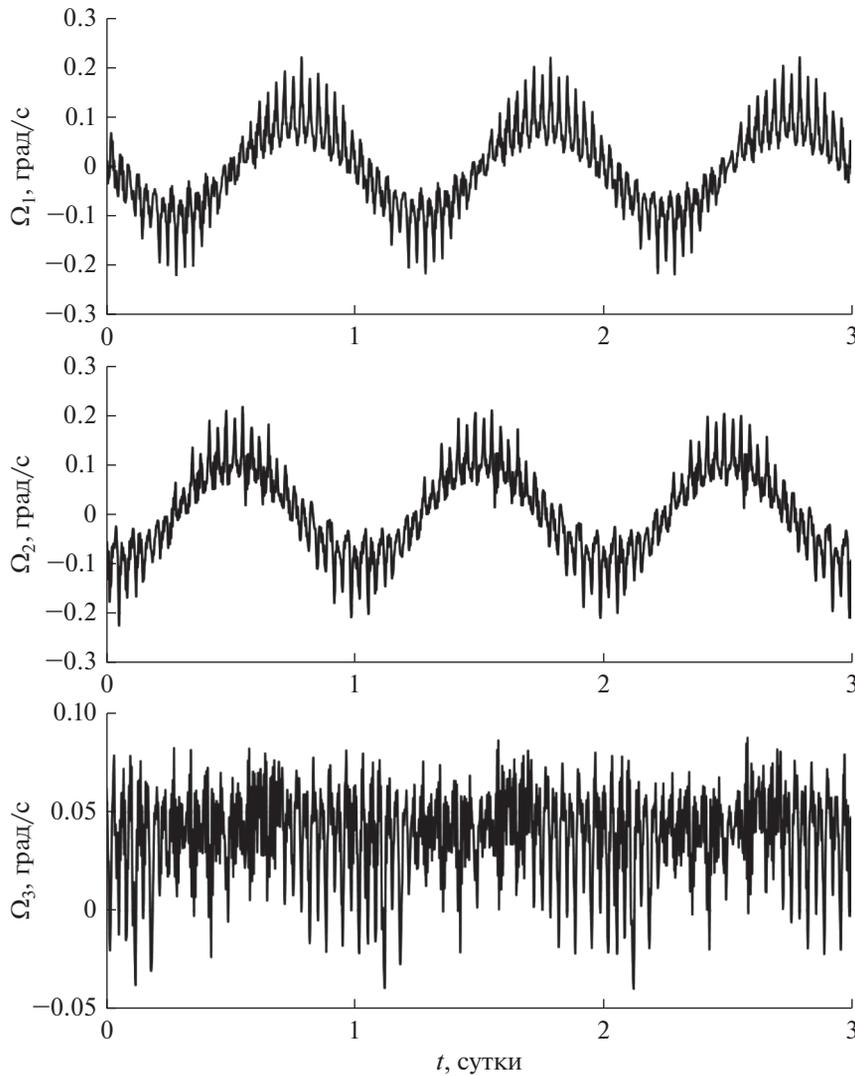


Рис. 1. Решение системы (1) при  $k_{\Omega} = 0.00015 \text{ с}^{-1}$ , компоненты вектора  $\Omega$ .

$$I(f) = \left[ \sum_{n=1}^N (x_n - x_*) \cos 2\pi f t_n \right]^2 + \left[ \sum_{n=1}^N (x_n - x_*) \sin 2\pi f t_n \right]^2, \quad x_* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n.$$

$$I_1(f) = \left[ \sum_{n=1}^N [x(t_n) - \alpha_0] \cos 2\pi f t_n \right]^2 + \left[ \sum_{n=1}^N [x(t_n) - \alpha_0] \sin 2\pi f t_n \right]^2.$$

Здесь  $f$  – пробная частота,  $F$  – частота Найквиста. Если моменты времени  $t_n$  выражены в секундах, то единицы измерения  $f$  и  $F$  – герцы. В данном случае  $F = 0.03125$  Гц. Использование периодограммы основано на следующем ее свойстве. Предположим, что исследуемая функция имеет вид

$$x(t) = \alpha_0 + \sum_{m=1}^M (\alpha_m \cos 2\pi f_m^\circ t + \beta_m \sin 2\pi f_m^\circ t),$$

где  $\alpha_0$  и  $\alpha_m, \beta_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) – постоянные параметры, все  $f_m^\circ > 0$  и среди них нет одинаковых. Составим выражение

Его можно преобразовать к виду

$$I_1(f) = \frac{N^2}{4} \sum_{m=1}^M (\alpha_m^2 + \beta_m^2) \cdot [W(f - f_m^\circ) + W(f + f_m^\circ)] + \Delta I_1(f),$$

$$N^2 W(f) = \left( \sum_{n=1}^N \cos 2\pi f t_n \right)^2 + \left( \sum_{n=1}^N \sin 2\pi f t_n \right)^2 = \frac{\sin^2 \pi N f h}{\sin^2 \pi f h},$$

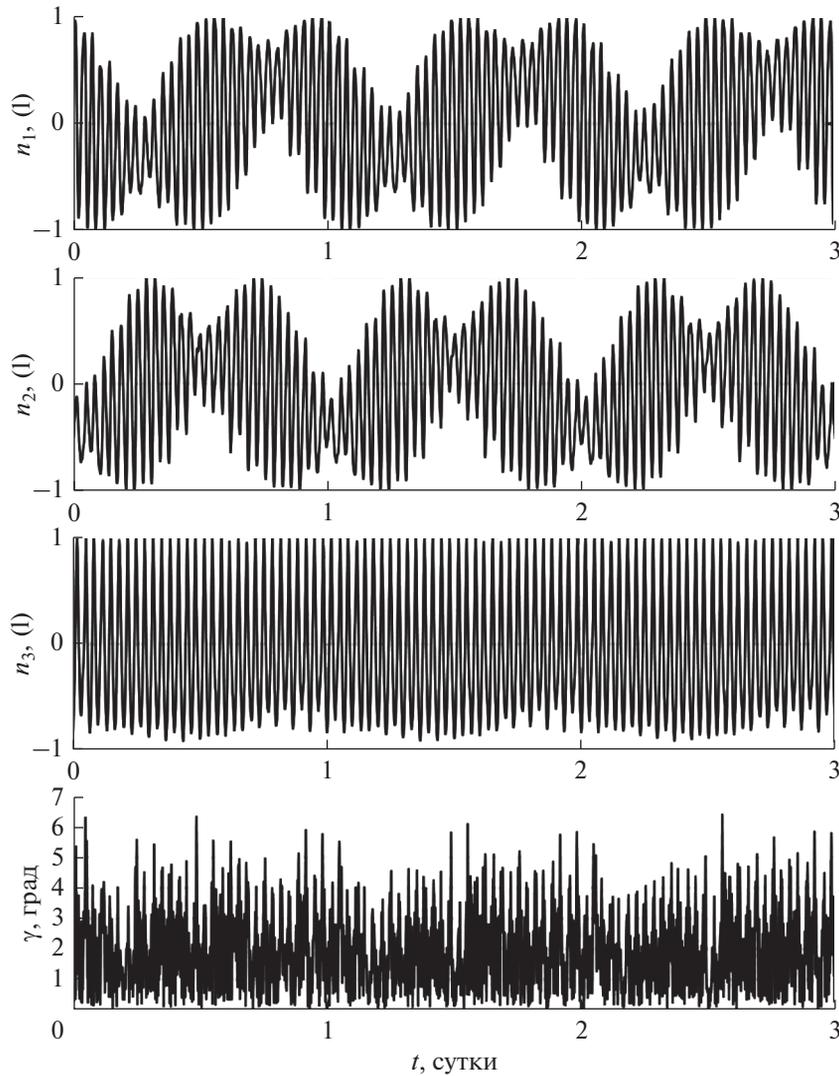


Рис. 2. Решение системы (1) при  $k_{\Omega} = 0.00015 \text{ с}^{-1}$ , компоненты орта  $\mathbf{n}$  и угол  $\gamma$ .

$$\Delta I_1(f) = \sum_{k < l} \sum_j \left\{ A_j \cos 2\pi[\Omega_j t_k + \Omega'_j t_l + f(t_l - t_k)] + B_j \sin 2\pi[\Omega_j t_k + \Omega'_j t_l + f(t_l - t_k)] \right\}.$$

В выражении для  $\Delta I_1(f)$  частоты  $\Omega_j$  и  $\Omega'_j$  принадлежат множеству чисел  $\{\pm f_1^{\circ}, \pm f_2^{\circ}, \dots, \pm f_M^{\circ}\}$ , коэффициенты  $A_j$  и  $B_j$  выражаются через  $\alpha_m$  и  $\beta_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ).

Функция  $W(f)$  называется функцией окна [6]. Она – четная, периодическая с периодом  $2F$  и удовлетворяет соотношениям  $0 \leq W(f) \leq 1$ ,  $W(0) = 1$ . Ее наименьший положительный нуль равен  $(Nh)^{-1}$ . Значимые максимумы (пики) функции окна равны 1 и достигаются в точках  $f = 2Fl$  ( $l = 0, 1, 2, \dots$ ). Вне малых окрестностей этих точек

$W(f) < 0.01$ . С увеличением  $N$  ширина пиков этой функции сужается. В силу четности и периодичности функция окна полностью определяется своими значениями на отрезке  $0 \leq f \leq F$ .

Для  $\Delta I_1(f)$  не удастся найти простых эффективных оценок, но при большом  $N$  вкладом этого слагаемого в значения функции  $I_1(f)$  вблизи точек ее значимых максимумов можно пренебречь и принять

$$\tilde{I}_1(f) = \frac{N^2}{4} \sum_{m=1}^M (\alpha_m^2 + \beta_m^2) \cdot [W(f - f_m^{\circ}) + W(f + f_m^{\circ})].$$

Таким образом, значимые максимумы функций  $I_1(f)$  и  $\tilde{I}_1(f)$  весьма близки. Отсюда, учитывая вид окна  $W(f)$ , можно найти точки этих максимумов –

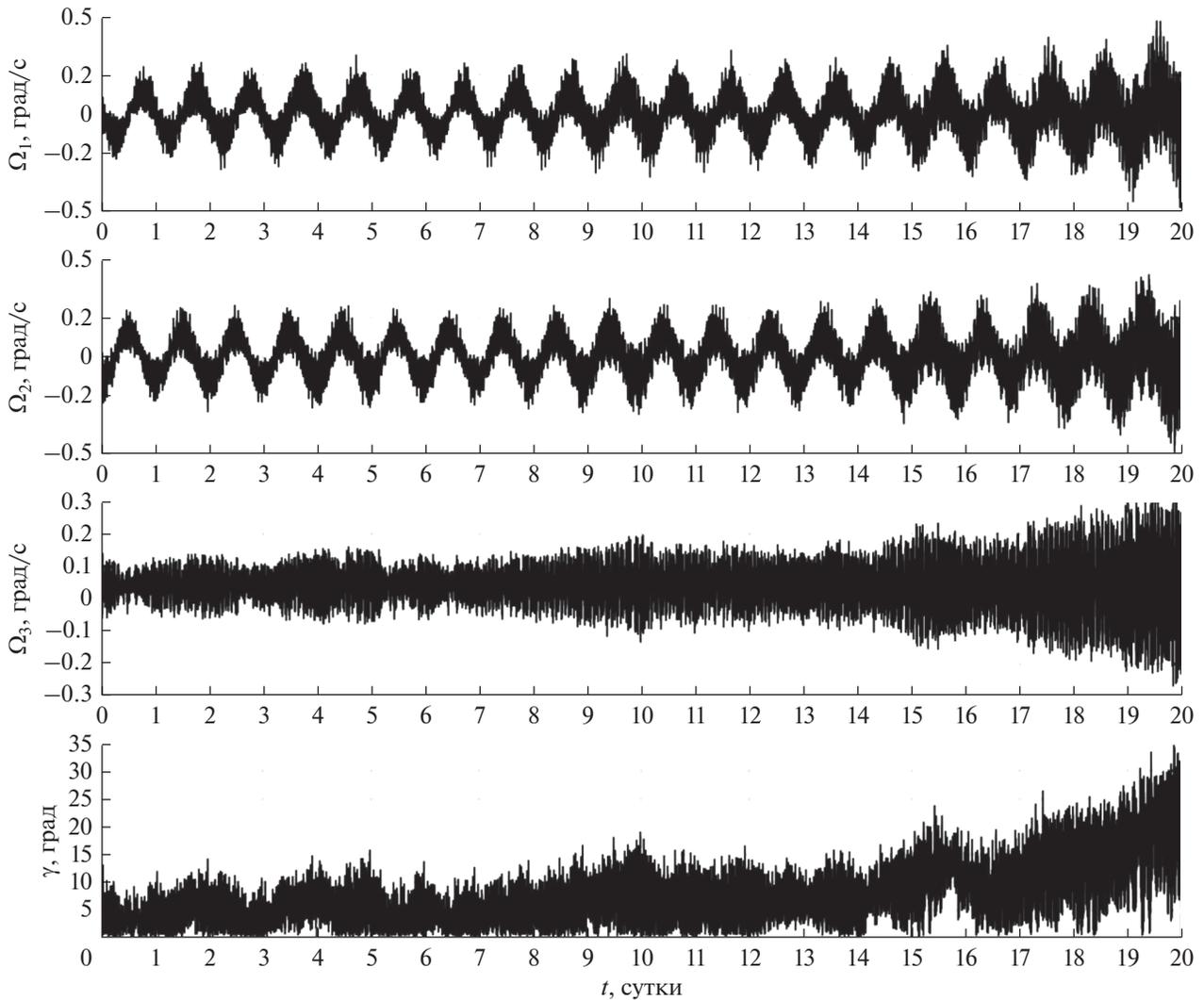


Рис. 3. Решение системы (1) при  $k_\Omega = 0$  и  $\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Omega} = 0$ , компоненты вектора  $\boldsymbol{\Omega}$  и угол  $\gamma$ .

они определяются соотношениями  $|f \pm f_m^\circ| = 2Fl$  ( $l = 0, 1, \dots$ ). Если  $f_m^\circ < F$ , то периодограмму  $I_l(f)$  достаточно исследовать на интервале  $0 < f < F$ . На нем ее значимые максимумы достигаются в малой окрестности точек  $f_m^\circ$ .

Вернемся к периодограмме  $I(f)$ . В случае исследуемых решений уравнений (1)  $\alpha_0 \approx x_*$ , значимые максимумы периодограммы достигаются в точках  $f_m^* \approx f_m^\circ$ , и  $\alpha_m^2 + \beta_m^2 \approx 4N^{-2}I(f_m^*)$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ). Точность выписанных соотношений увеличивается с ростом  $N$ . Таким образом, знание максимумов периодограммы позволяет получить оценки частот и амплитуд гармонических составляющих функции  $x(t)$ . Ниже вместо графиков периодограммы приводятся графики амплитудного спектра  $A(f) = 2N^{-1}\sqrt{I(f)}$ . Функция  $A(f)$  удобна тем, что

ее максимальные значения являются оценками амплитуд соответствующих гармоник. Однако ее значимые максимумы выражены менее наглядно значимых максимумов периодограммы.

На рис. 4 (слева) изображены амплитудные спектры  $A_{\Omega_i}(f)$  переменных  $\Omega_i(t)$  ( $i = 1, 2, 3$ ), графики которых приведены на рис. 1 ( $k_\Omega = 0.00015 \text{ c}^{-1}$ ). На рис. 4 (справа) изображены амплитудные спектры  $A_{\Omega_i}(f)$  переменных  $\Omega_i(t)$  ( $i = 1, 2, 3$ ), графики которых приведены на рис. 2 ( $k_\Omega = 0$ ). Амплитудные спектры представлены в диапазоне частот от 0 до  $F = 0.0008$  Гц. Для решения при  $k_\Omega = 0.00015 \text{ c}^{-1}$  частоты и амплитуды наиболее значимых гармоник приведены в табл. 1. Здесь  $f_E = \omega_E/2\pi$  — частота вращения Земли,  $f_0 = \omega_0/2\pi$  — орбитальная частота ( $\omega_0$  — среднее движение центра масс спутника). Наиболее зна-

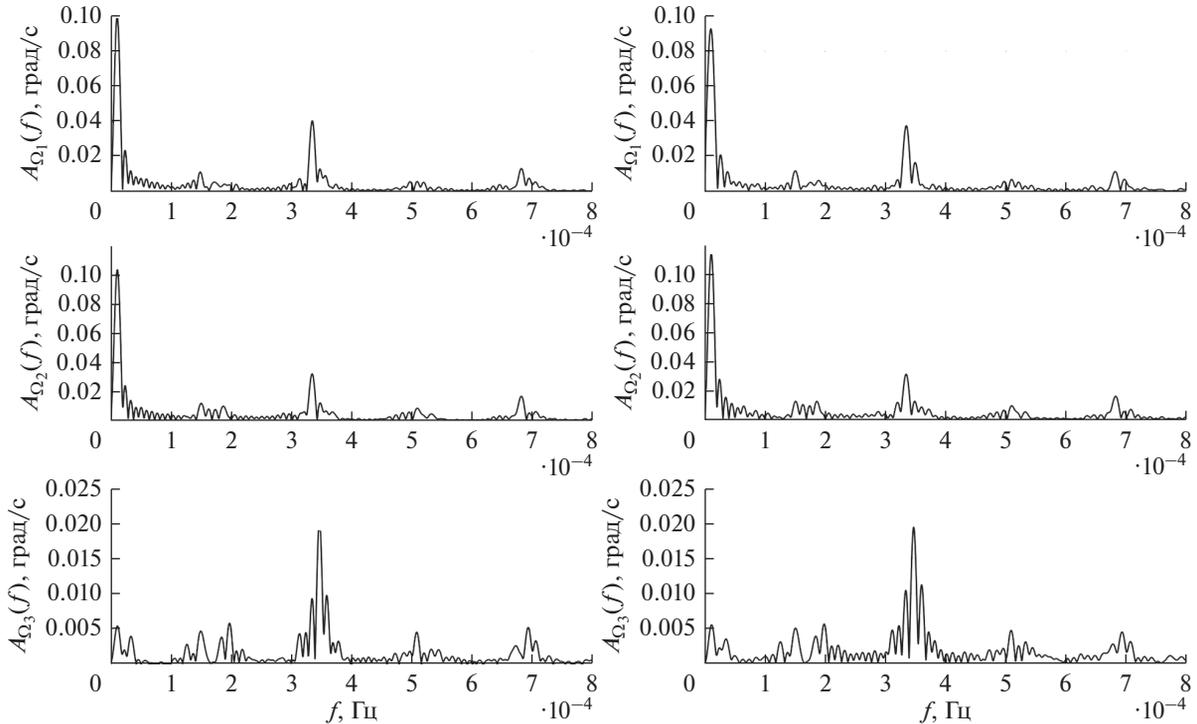


Рис. 4. Амплитудный спектр компонент вектора  $\Omega$ : слева –  $k_{\Omega} = 0.00015 \text{ c}^{-1}$ , справа –  $k_{\Omega} = 0$ .

чимый вклад в установившееся движение вносят гармоники с частотами  $f_E$  и  $2f_0 - f_E$ . Присутствие  $f_E$  объясняется тем, что переменные уравнений (1) относятся к гринвичской системе координат, частота  $2f_0 - f_E$  является доминирующей в гринвичских компонентах векторной функции  $\mathbf{V}(t)$  в уравнениях (1). В модели прямого диполя компоненты этой функции в инерциальной системе координат меняются с частотой  $2f_0$  [3].

#### 4. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ДВИЖЕНИЙ

Базисные частоты установившегося режима магнитной ориентации:  $f_0$  и  $f_E \approx f_0/16$ . Основываясь на этом свойстве и учитывая соотношение  $f_0 \gg f_E$ , построим аппроксимацию такого режима последовательностью периодических движений с периодом  $1/f_0$ , отличающихся положением орбиты относительно МПЗ.

На каждом орбитальном витке (между последовательными прохождениями восходящего узла орбиты) построим аппроксимирующее периодическое движение. При построении этого движения гринвичскую систему координат примем инерциальной, зафиксировав ее положение в абсолютном пространстве на момент прохождения спутником восходящего узла орбиты на данном витке. Орбиту в “замороженной” гринвичской системе примем кеплеровой эллиптической. Эле-

менты этой орбиты вычисляются по фазовому вектору реальной орбиты в начальном восходящем узле. Таким образом, от витка к витку долгота восходящего узла орбиты в “замороженной” гринвичской системе координат меняется, меняется и положение орбиты относительно МПЗ, но внутри витка эти долгота и положение относительно МПЗ остаются неизменными. Уравнения вращательного движения спутника возьмем в виде (1), положив в них  $\omega_E = 0$  и приняв в формулах для расчета координат и компонент скорости центра масс в “замороженной” гринвичской системе формулы кеплерова движения. Получившуюся систему уравнений обозначим (1a). Время входит в эту систему периодически с орбитальным периодом  $T$ , поэтому можно поставить задачу об отыскании ее периодических решений. Интерес представляет такое периодическое решение, которое можно будет использовать как аппроксимацию установившегося решения исходной системы (1) на данном витке.

Построение периодического решения системы (1a) сводится к решению для этой системы периодической краевой задачи

$$\begin{aligned} \Omega(t_0) = \Omega(t_0 + T), \quad \mathbf{n}(t_0) = \mathbf{n}(t_0 + T), \\ |\mathbf{n}(t_0)| = 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $t_0$  – момент прохождения восходящего узла орбиты на витке аппроксимации. Задача (1a), (3) решается методом пристрелки. Краевые условия (3) рассматриваются как уравнения для определения

неизвестных начальных условий  $\Omega(t_0), \mathbf{n}(t_0)$ . Первым приближением начальных условий периодического решения служат значения фазовых переменных аппроксимируемого решения в точке  $t_0$ . Можно также использовать начальное приближение  $\Omega(t_0) = 0, \mathbf{n}(t_0) = \mathbf{B}(t_0)/|\mathbf{B}(t_0)|$ .

На рис. 5, 6 приведены результаты аппроксимации установившегося решения уравнений (1), рассмотренного в разделе 2 ( $k_\Omega = 0.00015$ , рис. 1, 2). Здесь представлены графики зависимости от времени переменных  $\Omega_i, n_i$  и угла  $\gamma$ . Графики аппроксимируемого решения – сплошные линии, графики аппроксимирующего решения – пунктирные. На рис. 5 аппроксимация показана на интервале решения краевой задачи (1а), (3). В принципе, аппроксимацию периодическими решениями можно построить на весьма продолжительном интервале времени, длина которого зависит от наличия подходящей орбиты спутника. На рис. 5 графики аппроксимирующего решения в малых окрестностях моментов прохождения восходящих узлов орбиты налегают друг на друга (кеплеров период несколько больше драконического), но при выбранном масштабе графиков на рис. 5 налегания практически не заметны. На рис. 6 показан стык решений задачи (1а), (3) на соседних витках (пунктирные линии) на фоне аппроксимируемого решения (сплошные линии). Строго говоря, в аппроксимирующую последовательность включается только отрезок периодического решения, расположенный между начальным и конечным на данном витке восходящими узлами. Отрезок решения за конечным восходящим узлом отбрасывается.

Построенная аппроксимация оказалась достаточно точной. Это обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, кеплерова аппроксимация орбиты в данной задаче приемлема для построения вращательного движения спутника на орбитальном витке. Во-вторых, МПЗ в “замороженной” системе  $S_{y_1 y_2 y_3}$  в течение витка меняется сравнительно мало, поскольку оно близко к полю диполя, момент которого расположен вблизи точки  $S$  и составляет с осью  $-S y_3$  малый угол ( $\sim 12^\circ$ ). Поле прямого диполя в таком случае вообще не менялось бы.

Последовательность периодических решений уравнений (1а) позволяет сформировать идеальный режим одноосной ориентации спутника в случае  $k_\Omega = 0, \mathbf{n} \cdot \Omega = 0$ . Этот режим обеспечивает те же ошибки ориентации, что и при  $k_\Omega > 0$ , но не может быть реализован в действительности на продолжительном отрезке времени (см. ниже). Графики переменных  $\Omega_i(t), n_i(t)$  и угла  $\gamma(t)$  в этом режиме изображены пунктирными линиями на рис. 7 на фоне черных графиков, иллюстрирующих решение уравнений (1) при  $k_\Omega = 0, \mathbf{n} \cdot \Omega = 0$  из раздела 2 (рис. 3).

Таблица 1

№	Частоты		Амплитуды			
	$f$	интерпретация	$A_{\Omega 1}$	$A_{\Omega 2}$	$A_{\Omega 3}$	$A_\gamma$
	$10^{-4}$ Гц		$10^{-3}$ град/с			град
1	0.1145	$f_E$	99	103	5.44	0.142
2	0.3435	$3f_E$	12	14	3.99	0.232
3	1.506	$f_0 - 2f_E$	11	12	4.71	0.184
4	1.621	$f_0 - f_E$	1.75	8.11	0.68	0.312
5	1.850	$f_0 + f_E$	3.06	10	3.85	0.106
6	1.964	$f_0 + 2f_E$	3.84	2.64	5.84	0.076
7	3.356	$2f_0 - f_E$	40	32	9.36	0.139
8	3.470	$2f_0$	13	12	20	0.736
9	5.091	$3f_0 - f_E$	5.81	8.65	4.56	0.071
10	6.826	$4f_0 - f_E$	13	17	1.40	0.043
11	6.940	$4f_0$	7.66	5.45	5.24	0.166
12	8.675	$5f_0$	0.28	0.92	2.87	0.056
13	10.30	$6f_0 - f_E$	6.48	5.25	2.27	0.044
14	10.41	$6f_0$	6.05	1.67	2.06	0.139
15	12.15	$7f_0$	1.21	1.44	2.05	0.043
16	13.76	$8f_0 - f_E$	2.24	2.50	1.38	0.026
17	13.88	$8f_0$	3.81	1.01	1.65	0.180

### 5. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКА

Удобство аппроксимации решений уравнений (1) последовательностью периодических решений заключается в том, что, последние допуская детальное параметрическое исследование. Построив семейства решений краевой задачи (1а), (3) для различных значений  $l_0, k_\Omega$  и долготы  $\Omega_G$  восходящего узла орбиты в “замороженной” гринвичской системе координат можно в сжатом виде получить достаточно полное представление о решениях уравнений (1) на продолжительных интервалах времени, выбрать нужные параметры спутника.

Результаты решения задачи (1а), (3) представлены на рис. 8–10 графиками зависимости начальных условий от параметров  $l_0$  и  $\Omega_G$ . Графики построены при  $k_\Omega = 0, \mathbf{n} \cdot \Omega = 0$  (сплошные линии) и  $k_\Omega = 0.00015 \text{ с}^{-1}$  (пунктирные линии). В (3) принято  $t_0 = 0$ , элементы используемой в уравнениях (1а) кеплеровой орбиты (кроме долготы восходящего узла) совпадают с элементами орбиты спутника в момент  $t = 0$ . Решения найдены методом пристрелки, первое приближение разыскиваемых начальных условий:  $\Omega(0) = 0, \mathbf{n}(0) = \mathbf{B}(0)/|\mathbf{B}(0)|$ .

Графики на рис. 8, 9 построены при  $\Omega_G = 11.67^\circ$  и  $2 \leq l_0 \leq 6$ . Здесь  $[l_0] = \text{А/кг}$ . В случае  $k_\Omega = 0, \mathbf{n} \cdot \Omega = 0$  решения задачи (1а), (3) удалось найти не для всех значений  $l_0$ . Лакуны обусловле-

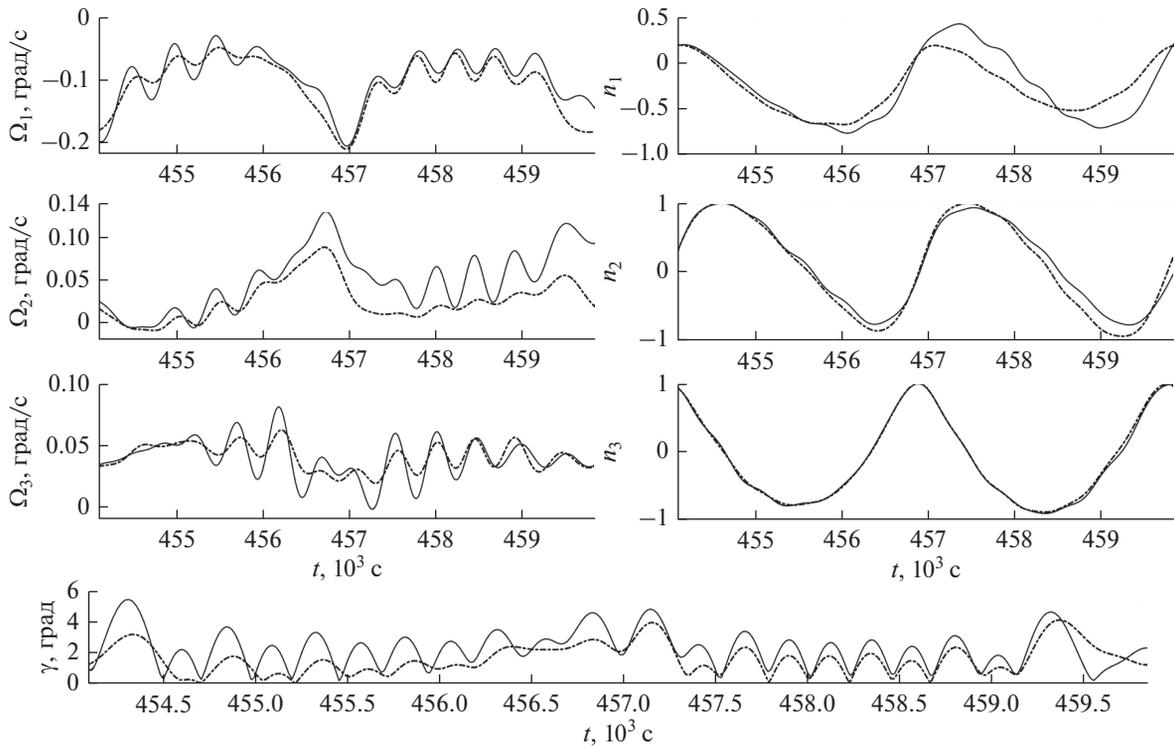


Рис. 5. Аппроксимация решений системы (1) при  $k_{\Omega} = 0.00015 \text{ c}^{-1}$ : компоненты вектора  $\Omega$ , орта  $\mathbf{n}$  и угол  $\gamma$ . Сплошные линии – решения системы (1), пунктирные линии – решения краевой задачи (1а), (3).

ны резонансами в системе (1а) и связанным с ними ветвлением периодических решений [2–4, 7]. Резонансы возникают между вращением вектора  $\mathbf{B}$  вдоль орбиты спутника и колебаниями орта  $\mathbf{n}$  относительно этого вектора.

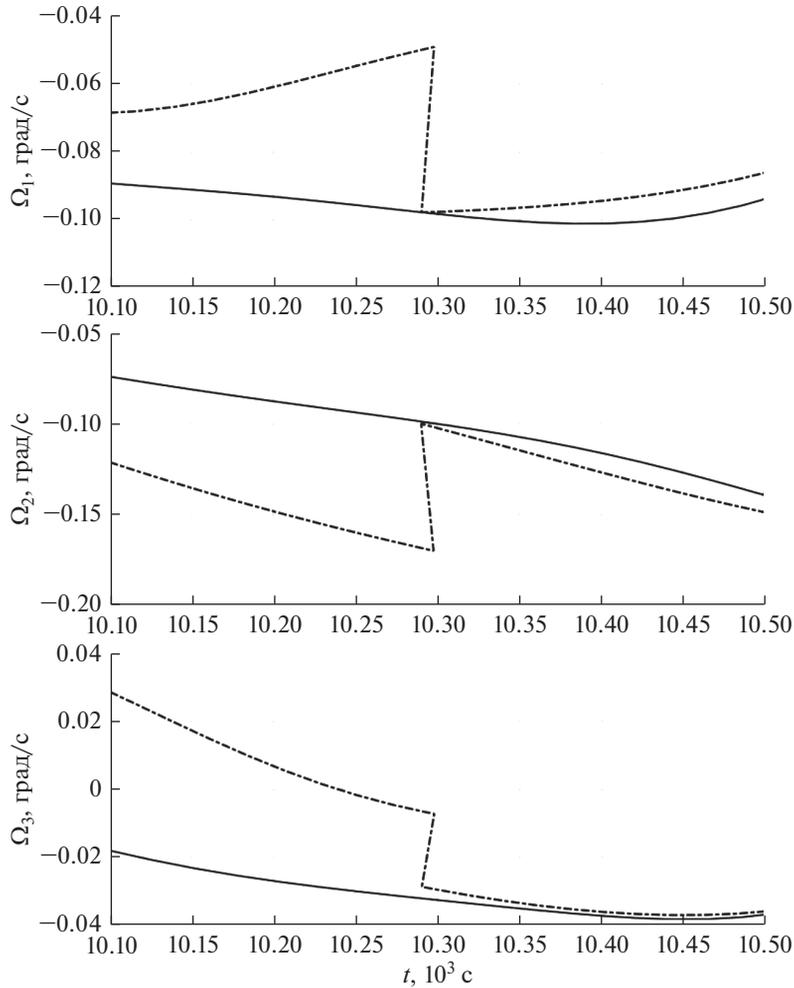
Графики на рис. 10 построены при  $l_0 = 4 \text{ А/кг}$  и  $0^\circ \leq \Omega_G \leq 360^\circ$ . В случае  $k_{\Omega} = 0$ ,  $\mathbf{n} \cdot \Omega = 0$  решения этой задачи найдены не для всех значений  $\Omega_G$ . Причина та же, что и у лагун графиков, показанных сплошными линиями на рис. 8, 9 – резонансы в системе (1а). Указанные резонансы проявляются не только в системе (1а), но в системе (1).

Из-за таких резонансов невозможно продолжительное существование режима магнитной ориентации спутника при  $k_{\Omega} = 0$ . Изменение режима магнитной ориентации в процессе суточного вращения Земли можно приближенно рассматривать, как изменение периодического решения системы (1а в функции угла  $\Omega_G$ . Решения задачи (1а), (3) с малым углом  $\gamma_{\max} = \max |\gamma(t)|$  ( $0 \leq t \leq T$ ) образуют однопараметрические семейства с параметром  $\Omega_G$ . При  $k_{\Omega} > 0$  существует одно такое семейство. Оно непрерывно зависит от  $\Omega_G$  на интервале изменения этого параметра, охватывающем многие сутки полета. Как следствие, режим поддерживается продолжительное время. В случае  $k_{\Omega} = 0$ ,  $\mathbf{n} \cdot \Omega = 0$  существует достаточно много семейств периодических реше-

ний, непрерывных по  $\Omega_G$  и имеющих на некоторых отрезках малый угол  $\gamma_{\max}$ . При каждом  $\Omega_G$  существует не более одного решения с  $\gamma_{\max} \ll 1$ . Лагуны – интервалы значений  $\Omega_G$ , на которых нет решений задачи (1а), (3) с малым  $\gamma_{\max}$ , – весьма коротки. Отрезок  $0 \leq \Omega_G \leq 2\pi$  на рис. 10 содержит две таких лагуны. При изменении  $\Omega_G$  в течение суток при переходе через лагуны аппроксимирующее периодическое решение перескакивает с одного семейства на другое. Указанные скачки приводят к постепенному нарушению ориентации (рис. 3).

Если в уравнениях (1) и (1а) принять модель МПЗ в виде прямого диполя и подходящее значение  $l_0$ , то резонансы при изменении  $\Omega_G$  не возникают. В этом случае режим магнитной ориентации существует продолжительное время. На интервале времени 20 сут нарастания амплитуды колебаний угла  $\gamma$  не наблюдается [8].

Резонансы в задаче (1а), (3) проявляются и при  $k_{\Omega} > 0$ . Рис. 11 содержит графики компонент векторов  $\Omega(t)$  и  $\mathbf{n}(t)$ ,  $0 \leq t \leq T$  решений этой задачи, вычисленных при  $k_{\Omega} = 0.00015 \text{ c}^{-1}$ ,  $\Omega_G = 11.67^\circ$  и двух значениях  $l_0$ : 4 А/кг (сплошные линии) и 4.186 А/кг (пунктирные линии). Амплитуды высокочастотных колебаний  $\Omega_i$  решений при  $l_0 = 4.186 \text{ А/кг}$  значительно выше, чем при  $l_0 = 4 \text{ А/кг}$ .



**Рис. 6.** Аппроксимация решений системы (1) при  $k_{\Omega} = 0.00015 \text{ с}^{-1}$ : компоненты вектора  $\Omega$ , орта  $\mathbf{n}$  и угол  $\gamma$ . Сплошные линии – решения системы (1), пунктирные линии – решения краевой задачи (1а), (3).

Это объясняется наличием в системе (1а) резонанса при  $l_0 = 4.186 \text{ А/кг}$  (см. рис. 8, 9). Однако вследствие указанной выше непрерывности по  $\Omega_G$  при  $k_{\Omega} > 0$  такие резонансы не приводят к разрушению ориентированного движения.

### 6. СУЩЕСТВОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

Чтобы строго доказать существование периодических решений, о которых говорилось разделах 4 и 5, уравнения (1а) запишем иначе. Введем две новые системы координат. Первая система связана с вектором  $\mathbf{B}$  индукции МПЗ в центре масс спутника – точке  $O$ . Эту систему обозначим  $Ox_1x_2x_3$ . Орты  $\mathbf{e}_i$  осей  $Ox_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) задаются соотношениями

$$\mathbf{e}_1 = \frac{\mathbf{B}}{B}, \quad \mathbf{e}_3 = \frac{\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{N}}{|\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{N}|}, \quad \mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{e}_1.$$

Здесь  $B = |\mathbf{B}|$ ,  $\mathbf{N}$  – орт нормали к плоскости орбиты, направленный по вектору орбитального кинетического момента спутника. Так как орбита спутника считается кеплеровой,  $\mathbf{N} = \text{const}$ . Проекция абсолютной угловой скорости системы  $Ox_1x_2x_3$  на ее собственные оси имеют вид

$$\Phi_1 = \Phi_2 \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{e}_1}{|\mathbf{N} \cdot \mathbf{e}_1|}, \quad \Phi_2 = -\frac{\dot{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{e}_3}{B}, \quad \Phi_3 = \frac{\dot{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{e}_2}{B}.$$

Вторая система координат  $Ox_1x_2x_3$  образована осями Резаля спутника. Ее ось  $Ox_1$  направлена по орту  $\mathbf{n}$ . Система  $Ox_1x_2x_3$  получаются из осей системы  $Ox_1x_2x_3$  двумя поворотами. Сначала на угол  $\alpha$  вокруг оси  $Ox_2$ , затем на угол  $\beta$  вокруг оси  $Ox_3$ , получившейся после первого поворота. Компоненты абсолютной угловой скорости спутника в системе  $Ox_1x_2x_3$  обозначим  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ . Уравнения (1) с использованием введенных систем координат можно записать в виде [3, 9]

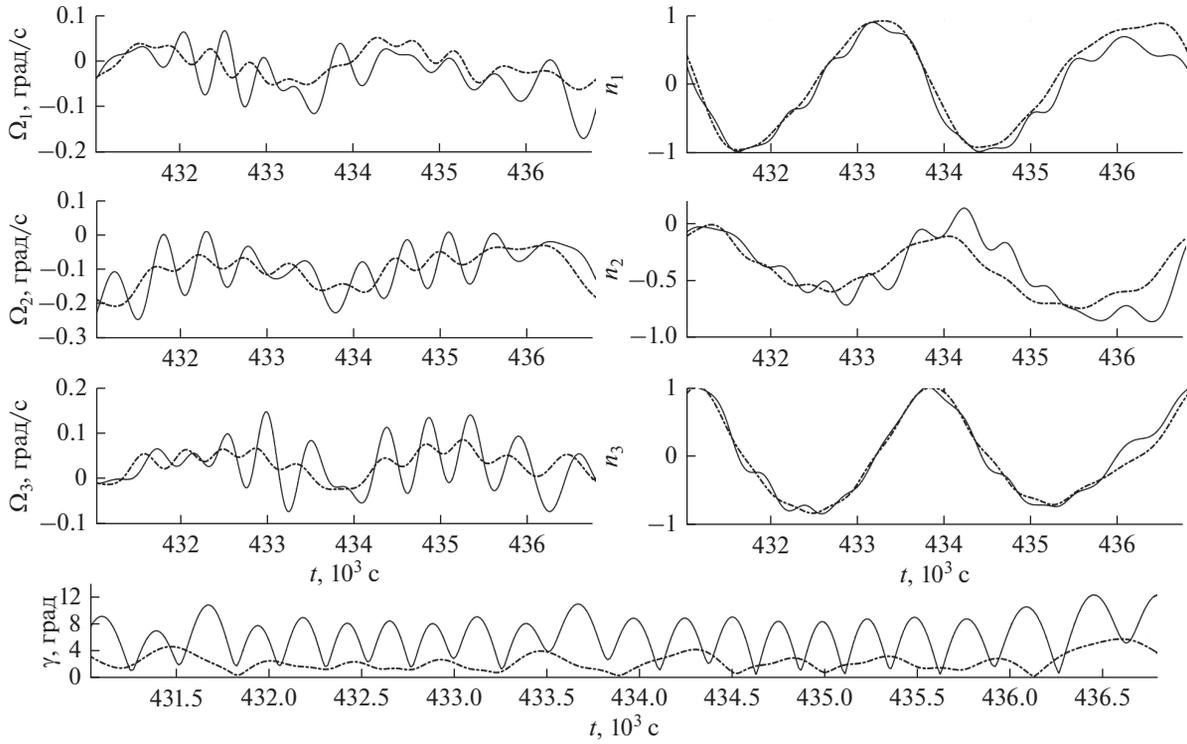


Рис. 7. Аппроксимация решений системы (1) при  $k_{\Omega} = 0$ : компоненты вектора  $\Omega$ , орта  $\mathbf{n}$  и угол  $\gamma$ . Сплошные линии – решения системы (1), пунктирные линии – решения краевой задачи (1а), (3).

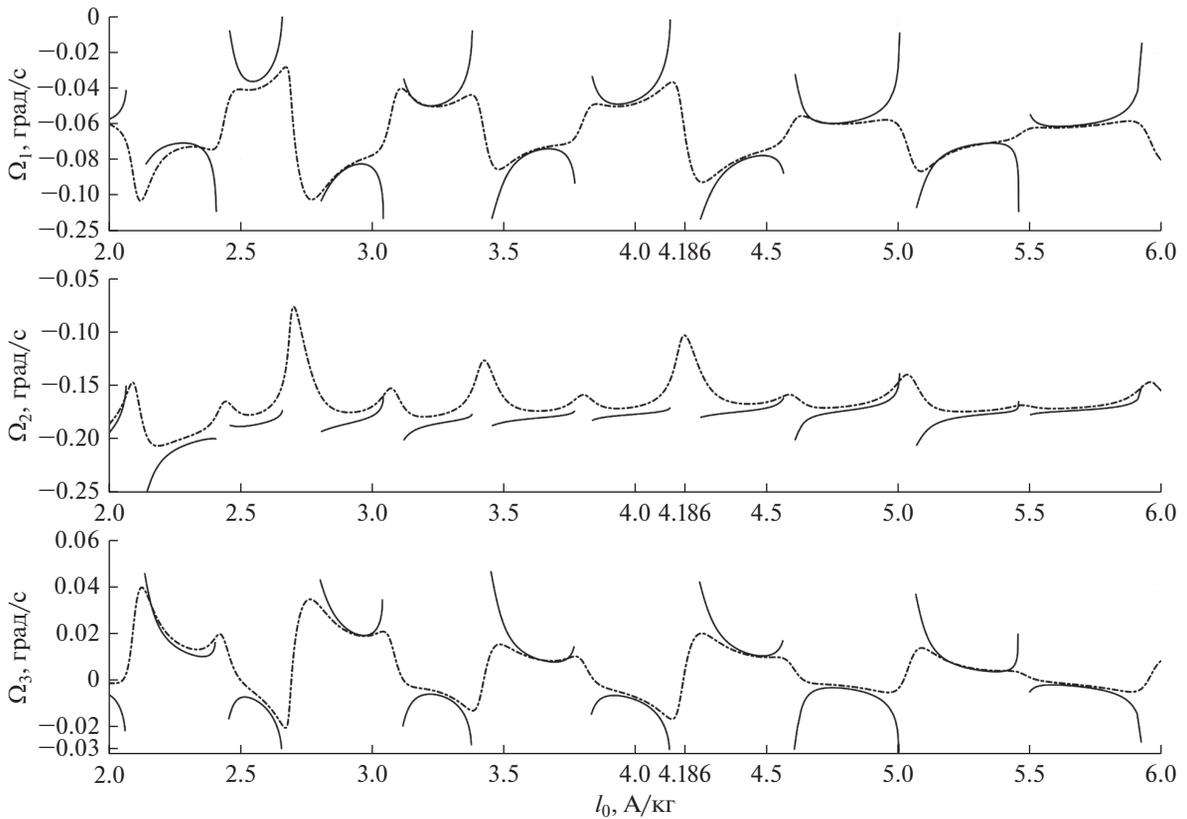


Рис. 8. Начальные условия решений краевой задачи (1а), (3) при  $\Omega_G = 11.67^\circ$ : компоненты вектора  $\Omega(0)$ .

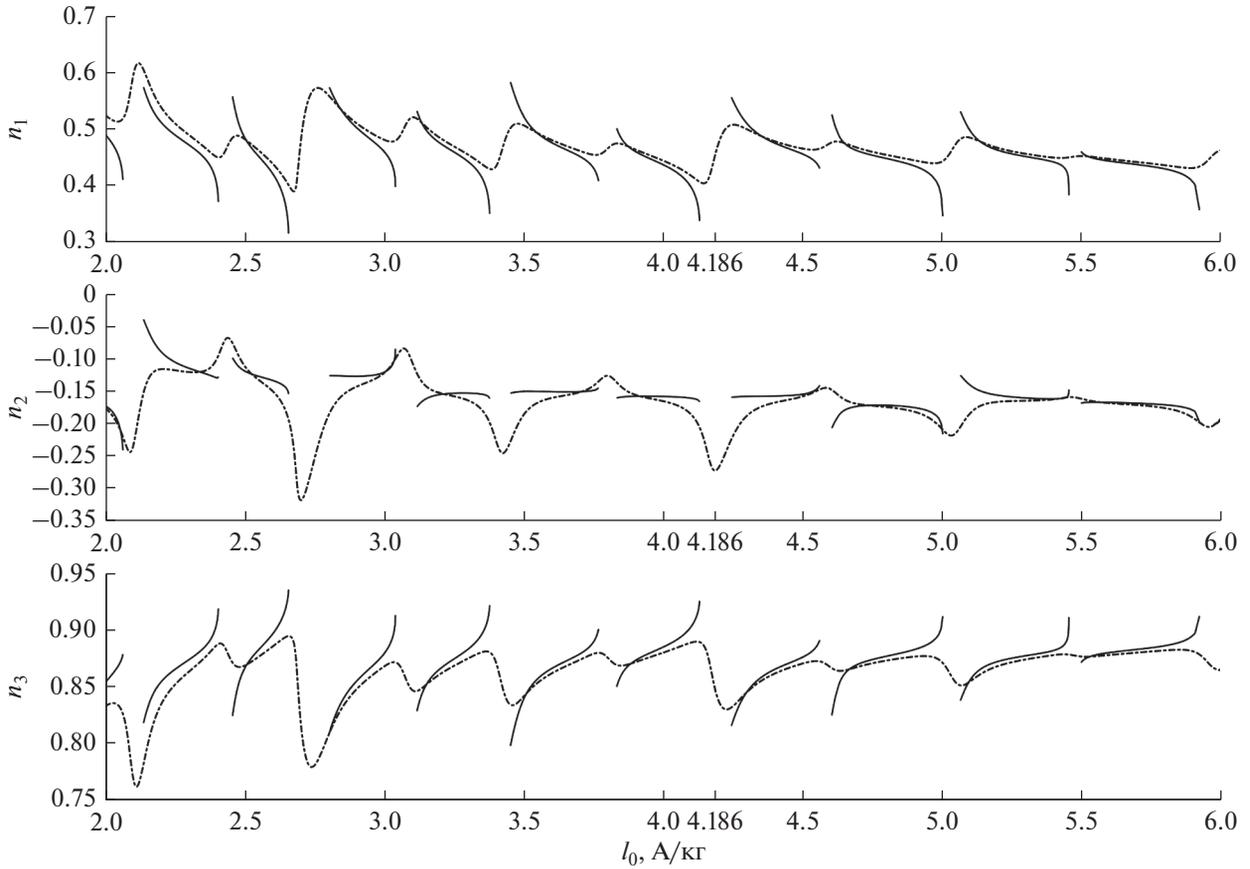


Рис. 9. Начальные условия решений краевой задачи (1а), (3) при  $\Omega_G = 11.67^\circ$ : компоненты орта  $\mathbf{n}(0)$ .

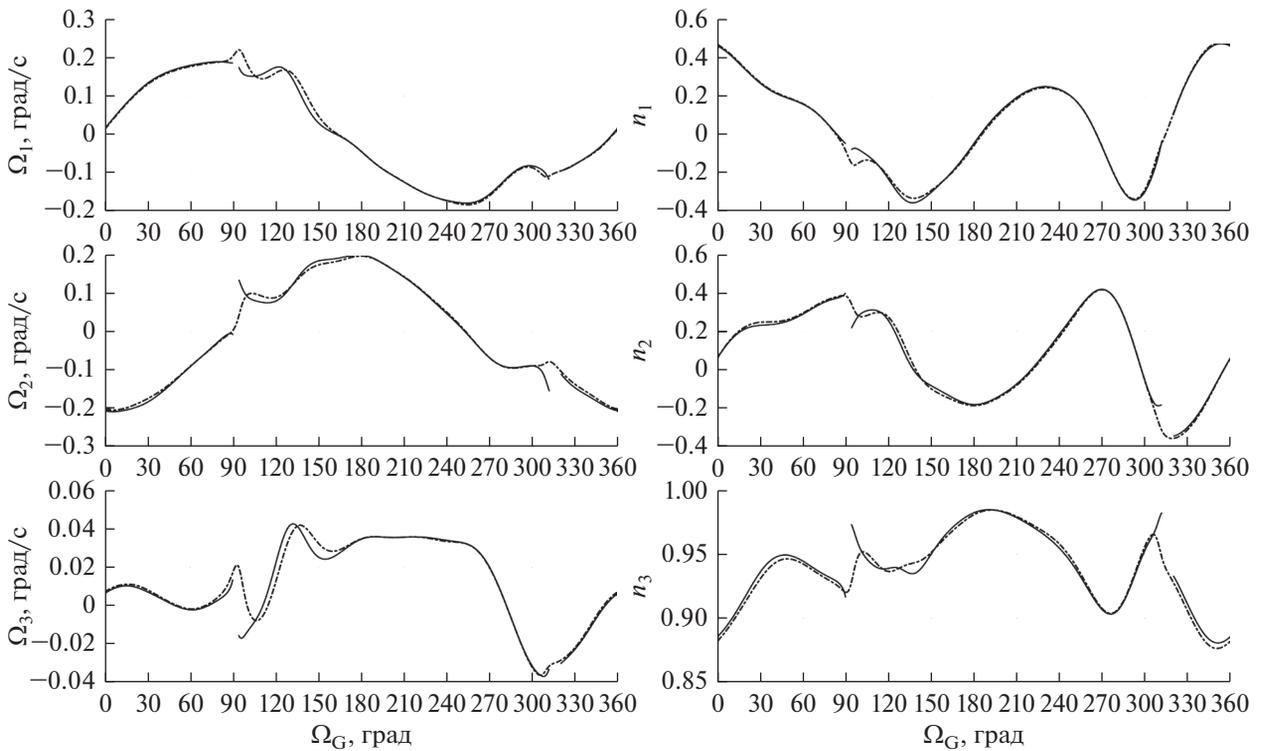
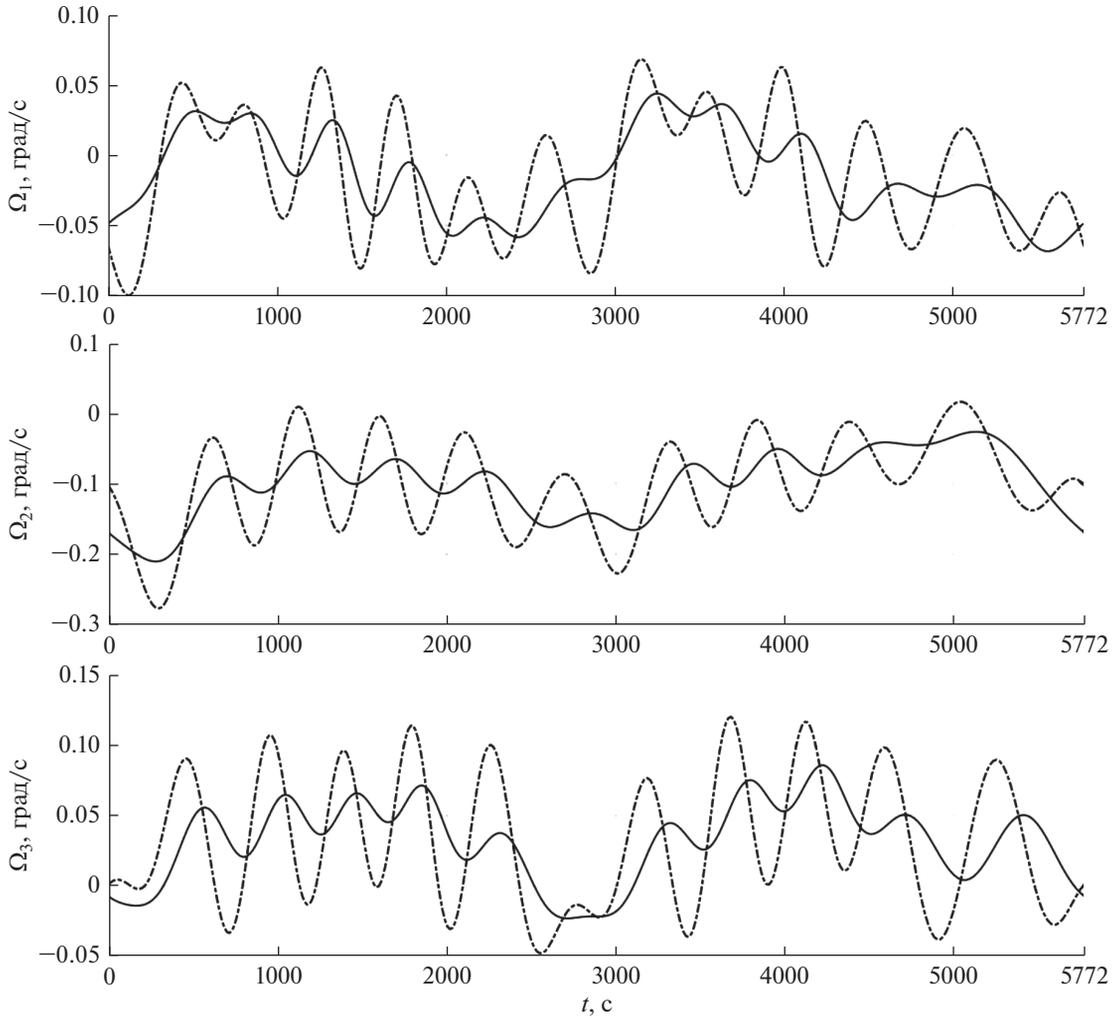


Рис. 10. Начальные условия решений краевой задачи (1а), (3)  $\Omega(0)$  и  $\mathbf{n}(0)$ , сплошные линии – при  $k_\Omega = 0$ , пунктирные линии – при  $k_\Omega = 0.00015 \text{ с}^{-1}$ .



**Рис. 11.** Решение краевой задачи (1а), (3): компоненты вектора  $\Omega$ , сплошные линии – при  $k_\Omega = 0.00015 \text{ c}^{-1}$  и  $l_0 = 4 \text{ А/кг}$ , пунктирные линии – при  $k_\Omega = 0.00015 \text{ c}^{-1}$  и  $l_0 = 4.186 \text{ А/кг}$ .

$$\begin{aligned}
 \lambda \dot{\omega}_1 &= -k_\Omega \omega_1, \\
 \dot{\omega}_2 &= -k_\Omega \omega_2 - \left( \lambda \omega_1 - \omega_2 \text{tg} \beta - \frac{\Phi_1 \cos \alpha - \Phi_3 \sin \alpha}{\cos \beta} \right) \cdot \\
 &\quad \cdot \omega_3 - l_0 B \sin \alpha - \nu(1 - \lambda)x_1 x_3, \\
 \dot{\omega}_3 &= \left( \lambda \omega_1 - \omega_2 \text{tg} \beta - \frac{\Phi_1 \cos \alpha - \Phi_3 \sin \alpha}{\cos \beta} \right) \cdot \\
 &\quad \cdot \omega_2 - k_\Omega \omega_3 - l_0 B \cos \alpha \sin \beta + \nu(1 - \lambda)x_1 x_2, \\
 \omega_2 &= (\dot{\alpha} + \Phi_2) \cos \beta - (\Phi_1 \cos \alpha - \Phi_3 \sin \alpha) \sin \beta, \\
 \omega_3 &= \dot{\beta} + \Phi_1 \sin \alpha + \Phi_3 \cos \alpha.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь  $x_i$  – компоненты геоцентрического вектора точки  $O$  в системе  $Ox_1x_2x_3$ . Так как орбита спутника считается кеплеровой эллиптической, время входит в систему (4) периодически с орбитальным периодом  $T$ . Исследование периодических решений этой системы при  $k_\Omega = 0$  и при  $k_\Omega > 0$  проводится по-разному. Рассмотрим сначала слу-

чай  $k_\Omega = 0$ . Доказательство существования периодических решений системы (4) в этом случае практически идентично доказательству работы [4]. В [4] использована модель МПЗ в виде прямого диполя, и орбита спутника принята круговой, но эти упрощения не принципиальны.

Так как  $\omega_1 = \text{const}$  при  $k_\Omega = 0$ , первое уравнение системы (4) рассматривать не будем, а в остальных ее уравнениях  $\omega_1$  будем считать параметром. Введем новую независимую переменную  $\tau$  и постоянную  $b$ , положив

$$\tau = \int_0^t \sqrt{B(s)} ds, \quad b = \frac{1}{2} \int_0^T \sqrt{B(s)} ds.$$

Исключим  $\omega_2, \omega_3$  из последних четырех уравнений (4) и перейдя к независимой переменной  $\tau$ , получим систему, которую запишем в векторном виде [4]

$$A(q)q'' + \mu^2 \frac{\partial \Pi(q)}{\partial q} = C(\tau)q' + f(\tau, q, q'). \quad (5)$$

Здесь штрихом обозначено дифференцирование по  $\tau$ ,  $q = (\alpha, \beta)^T$ ,

$$A(q) = \text{diag}(\cos^2 \beta, 1), \quad \Pi = -\cos \alpha \cos \beta, \\ \mu = \sqrt{l_0},$$

$$C(\tau) = \begin{pmatrix} g(\tau) & -p(\tau) \\ p(\tau) & g(\tau) \end{pmatrix}, \quad g = -\frac{B'}{2B}, \quad p = \frac{\lambda \omega_1 - 2\Phi_1}{\sqrt{B}},$$

$$f(\tau, q, q') - f(\tau, 0, 0) = O(\|q\| + \|q'\|^2),$$

$B$  и  $\Phi_1$  выражаются в функции  $\tau$ ,  $\|\cdot\|$  – евклидова норма. Переменная  $\tau$  входит в систему (5) периодически с периодом  $2b$ . Рассмотрим начальную задачу  $2Y' = CY$ ,  $Y(0) = E_2 \equiv \text{diag}(1, 1)$ . Ее решение

$$Y(\tau) = \sqrt[4]{\frac{B(0)}{B(\tau)}} \begin{pmatrix} \cos \psi(\tau) & -\sin \psi(\tau) \\ \sin \psi(\tau) & \cos \psi(\tau) \end{pmatrix}, \quad \psi(\tau) = \frac{1}{2} \int_0^\tau p(s) ds.$$

Представим его в виде произведения  $Y(\tau) = Y_1(\tau) \cdot Y_2(\tau)$ , где

$$Y_1(\tau) = \sqrt[4]{\frac{B(0)}{B(\tau)}} \begin{pmatrix} \cos \tilde{\psi}(\tau) & -\sin \tilde{\psi}(\tau) \\ \sin \tilde{\psi}(\tau) & \cos \tilde{\psi}(\tau) \end{pmatrix}, \\ Y_2(\tau) = \begin{pmatrix} \cos a\tau & -\sin a\tau \\ \sin a\tau & \cos a\tau \end{pmatrix}, \\ \tilde{\psi}(\tau) = \psi(\tau) - a\tau, \\ a = \frac{1}{4b} \int_0^{2b} p(s) ds = \frac{\lambda \omega_1 T}{4b} - \frac{1}{2b} \int_0^T \Phi_1(t) dt.$$

Функция  $\tilde{\psi}(\tau)$  и матрица  $Y_1(\tau)$  – периодические по  $\tau$  с периодом  $2b$ , матрицы  $Y_1(\tau)$ ,  $Y_2(\tau)$  удовлетворяют уравнениям

$$Y_1' + Y_1 H = \frac{1}{2} C Y_1, \quad Y_2' = H Y_2, \quad H = \begin{pmatrix} 0 & -a \\ a & 0 \end{pmatrix}.$$

В системе (5) сделаем замену переменных  $q \mapsto y$ :  $q = Y_1(\tau)y$ . Получим систему

$$y'' - 2Hy' + (\mu^2 E_2 + H^2)y = f_1(\tau, y, y') + \mu^2 F(\tau, y), \quad (6)$$

в которой гладкие  $2b$ -периодические по  $\tau$  функции  $f_1$  и  $F$  допускают оценки

$$f_1(\tau, y, y') - f_1(\tau, 0, 0) = O(\|y\| + \|y'\|^2), \\ F(\tau, y) = O(\|y\|^2).$$

Введем множество  $I(\varepsilon) = \{\mu : \mu > 0, |\sin b(\mu + a) \sin b(\mu - a)| \geq \varepsilon\}$ ,  $\varepsilon \in (0, 1)$ . Оно не пусто и не ограничено. При  $\varepsilon \ll 1$  оно представляет собой интервал  $(0, +\infty)$  из которого удалены попав-

шие в него малые окрестности точек вида  $\mu = \pm a + \pi m/b$  при целом  $m$ . Справедлива следующая теорема.

Для любого  $\varepsilon \in (0, 1)$  существуют такие положительные числа  $M$ ,  $C_1$  и  $C_2$ , что при  $\mu \geq M$ ,  $\mu \in I(\varepsilon)$  система (6) имеет единственное решение  $y_*(\tau, \mu)$ , непрерывно зависящее от  $\mu$  и удовлетворяющее неравенствам

$$\|y_*(\tau, \mu)\| \leq \frac{C_1}{\mu^2}, \quad \|y_*'(\tau, \mu)\| \leq \frac{C_2}{\mu}, \\ (0 \leq \tau \leq 2b).$$

К типу таких решений относятся рассмотренные выше решения в случае  $k_\Omega = 0$ . При  $k_\Omega \neq 0$  периодические решения системы (4) могут существовать только при  $\omega_1 = 0$ . Последнее соотношение позволяет отбросить первое уравнение этой системы и перейти к системе вида (5), в матрице  $C(\tau)$  которой

$$g = -\frac{k_\Omega}{\sqrt{B}} - \frac{B'}{2B}, \quad p = -\frac{2\Phi_1}{\sqrt{B}}.$$

Решение начальной задачи  $2Y' = CY$ ,  $Y(0) = E_2$  теперь имеет вид

$$Y(\tau) = \sqrt[4]{\frac{B(0)}{B(\tau)}} e^{-\varphi(\tau)} \begin{pmatrix} \cos \psi(\tau) & -\sin \psi(\tau) \\ \sin \psi(\tau) & \cos \psi(\tau) \end{pmatrix}, \\ \varphi(\tau) = \frac{k_\Omega}{2} \int_0^\tau B^{-1/2} ds = \frac{k_\Omega t}{2}, \quad \psi(\tau) = -\int_0^\tau \Phi_1 B^{-1/2} ds.$$

Представим это решение в виде произведения  $Y(\tau) = Y_1(\tau)Y_2(\tau)$ , где

$$Y_1(\tau) = \sqrt[4]{\frac{B(0)}{B(\tau)}} e^{-\tilde{\varphi}(\tau)} \begin{pmatrix} \cos \tilde{\psi}(\tau) & -\sin \tilde{\psi}(\tau) \\ \sin \tilde{\psi}(\tau) & \cos \tilde{\psi}(\tau) \end{pmatrix}, \\ Y_2(\tau) = e^{-d\tau} \begin{pmatrix} \cos a\tau & -\sin a\tau \\ \sin a\tau & \cos a\tau \end{pmatrix}, \\ \tilde{\varphi}(\tau) = \varphi(\tau) - d\tau, \quad d = \frac{k_\Omega T}{4b} > 0, \\ \tilde{\psi}(\tau) = \psi(\tau) - a\tau, \quad a = -\frac{1}{2b} \int_0^T \Phi_1(t) dt.$$

Функции  $\tilde{\varphi}(\tau)$   $\tilde{\psi}(\tau)$  и матрица  $Y_1(\tau)$  зависят от  $\tau$  периодически с периодом  $2b$ , матрицы  $Y_1(\tau)$ ,  $Y_2(\tau)$  удовлетворяют уравнениям

$$Y_1' + Y_1 H = \frac{1}{2} C Y_1, \quad Y_2' = H Y_2, \quad H = \begin{pmatrix} -d & -a \\ a & -d \end{pmatrix}.$$

В новой системе (5) сделаем замену переменных  $q \mapsto y$ :  $q = Y_1(\tau)y$ . Получим систему вида (6), в которой  $2b$ -периодические по  $\tau$  функции  $f_1$  и  $F$  допускают указанные выше оценки.

Введем множество

$$I(\varepsilon) = \{\mu : \mu > 0, [\text{sh}^2 bd + \sin^2 b(\mu + a)] \cdot [\text{sh}^2 bd + \sin^2 b(\mu - a)] \geq \varepsilon^2\},$$

$0 < \varepsilon < \sqrt{1 + \text{sh}^2 db}$ . Оно не пусто и не ограничено. При  $\varepsilon < \text{sh} db$  оно совпадает с интервалом  $(0, +\infty)$ . С новым множеством  $I(\varepsilon)$  сформулированная выше теорема справедлива и для новой системы (6). Взяв  $\varepsilon < \text{sh} db$ , можно игнорировать резонансы, существующие при  $k_\Omega = 0$ , но это потребует увеличения постоянных  $M$ ,  $C_1$  и  $C_2$ . В случае  $k_\Omega > 0$  влияние резонансов уменьшается по мере увеличения  $\mu$ .

Множество  $I(\varepsilon)$  можно рассматривать в плоскости  $(\mu, \Omega_G)$ . На этом множестве решение  $y_*(\tau, \mu)$  непрерывно зависит от обоих параметров. Именно такие решения имелись в виду в заключительной части предыдущего раздела, где говорилось о семействах решений задачи (1'), (3), зависящих от  $\Omega_G$ .

## 7. УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

Исследование устойчивости сводилось к вычислению мультипликаторов соответствующей системы уравнений в вариациях. Мультипликаторы обозначим  $\rho_k$  ( $k = 1, 2, \dots, 6$ ). Пусть сначала  $k_\Omega = 0$ . В этом случае система (1a) имеет первый интеграл  $\Omega \cdot \mathbf{n} = \text{const}$  и интегральное соотношение  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{n} = 1$ , поэтому два ее мультипликатора  $\rho_1 = \rho_2 = 1$ . Систему (1a) при  $k_\Omega = 0$  можно привести к гамильтоновой форме. Следовательно, необходимые условия устойчивости ее периодических решений выражаются равенствами  $|\rho_k| = 1$ . Последние равенства проверялись при  $k = 3, 4, 5, 6$  вместе с равенствами  $\rho_1 = \rho_2 = 1$  для каждого найденного решения задачи (1a), (3). Необходимые условия устойчивости оказались выполненными для всех таких решений. Но расчеты были сделаны для дискретного набора значений  $l_0$  и  $\Omega_G$ , поэтому малые области неустойчивости в плоскости этих параметров могли быть пропущены. В таких возможных областях  $|\rho_k| \approx 1$ , и неустойчивость слабая.

При  $k_\Omega > 0$  система (1a) имеет интегральное соотношение  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{n} = 1$ , а скалярное произведение  $\Omega \cdot \mathbf{n} = \xi$  удовлетворяет соотношению  $\xi + k_\Omega \xi = 0$ . Отсюда находим два мультипликатора  $\rho_1 = 1, \rho_2 = \exp(-k_\Omega T)$ . По теореме Лиувилля  $\prod_{k=1}^6 \rho_k = \exp(-3k_\Omega T)$ , поэтому  $\prod_{k=3}^6 \rho_k =$

$= \exp(-2k_\Omega T)$ . Достаточные условия устойчивости решений задачи (1a), (3) выражаются неравенствами  $|\rho_k| < 1$  ( $k = 3, 4, 5, 6$ ). Эти неравенства, а также выписанные соотношения для  $\rho_1, \rho_2$  и  $\prod_{k=3}^6 \rho_k$  оказались выполненными для всех найденных решений. Во всех этих решениях мультипликаторы  $\rho_k$  ( $k = 3, 4, 5, 6$ ) образуют две комплексно-сопряженные пары, причем  $|\rho_k| \approx \exp(-k_\Omega T/2)$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построены установившиеся движения спутника, в которых его продольная ось симметрии составляет малый угол с вектором напряженности МПЗ. Рассмотрены установившиеся движения спутника при наличии и при отсутствии демпфирования.

2. Предложен способ аппроксимации ориентированного движения спутника посредством набора периодических решений. Такая аппроксимация упрощает параметрическое исследование этого движения. Приведены результаты исследований устойчивости периодических движений спутника при наличии и при отсутствии демпфирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белецкий В.В.* Движение искусственного спутника относительно центра масс. М.: Наука, 1965.
2. *Сарычев В.А., Сазонов В.В., Овчинников М.Ю.* Периодические колебания спутника относительно центра масс под действием магнитного момента. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 1982. № 182.
3. *Сарычев В.А., Овчинников М.Ю.* Магнитные системы ориентации искусственных спутников Земли. Итоги науки и техники. Исследование космического пространства. Т. 23. М.: ВИНИТТИ, 1985.
4. *Сазонов В.В.* Одноосная магнитная ориентация искусственных спутников // Механика твердого тела. 1987. № 2. С. 27–32.
5. *Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.* Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985.
6. *Теребиж В.Ю.* Анализ временных рядов в астрофизике. М.: Наука, 1992.
7. *Хентов А.А.* Влияние магнитного и гравитационного полей Земли на колебания спутника вокруг своего центра масс // Космич. исслед. 1967. Т. 5. № 4. С. 554–572.
8. *Игнатов А.И., Сазонов В.В.* Исследование установившихся движений искусственного спутника Земли в режиме одноосной магнитной ориентации. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 25.
9. *Овчинников М.Ю., Пеньков В.И., Ролдугин Д.С., Иванов Д.С.* Магнитные системы ориентации малых спутников. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2016.

УДК 629.198

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КОРАБЛЕЙ ПРОГРЕСС В РЕЖИМЕ ОДНООСНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ТОКА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

© 2021 г. М. Ю. Беляев<sup>1</sup>, Т. В. Матвеева<sup>1</sup>, М. И. Монахов<sup>1</sup>, Д. Н. Рулев<sup>1</sup>, В. В. Сазонов<sup>2</sup>, \*

<sup>1</sup>Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королева, Королев, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

\*sazonov@keldysh.ru

Поступила в редакцию 04.07.2019 г.

После доработки 24.11.2019 г.

Принята к публикации 19.12.2019 г.

Реконструировано неуправляемое вращательное движение транспортных грузовых кораблей *Прогресс М-24М* и *М-25М* в режиме одноосной солнечной ориентации (так называемая закрутка на Солнце). Начальные условия движения в этом режиме – закрутка корабля с угловой скоростью 2.2–2.4 град/с вокруг нормали к плоскости солнечных батарей, направленной на Солнце. Продолжительность режима – несколько орбитальных витков. Реконструкция выполнена с помощью интегральной статистической методики по телеметрическим значениям тока, снимаемого с его солнечных батарей. В результате определяется вращательное движение корабля относительно направления Земля–Солнце. Проведено исследование спектра колебаний тока во время закрутки, поясняющее возможность реконструкции на основании таких, на первый взгляд, малоинформативных данных.

DOI: 10.31857/S0023420621020011

### ОДНООСНАЯ СОЛНЕЧНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ ТГК *ПРОГРЕСС*

Одноосная солнечная ориентация (закрутка на Солнце) – один из штатных режимов автономного полета транспортный грузовых кораблей (ТГК) *Прогресс*. Начальные условия движения в этом режиме – закрутка корабля с угловой скоростью 2.2–2.4 град/с вокруг направленной на Солнце нормали к плоскости солнечных батарей (СБ). Нормаль образует малый угол с главной центральной осью максимального момента инерции ТГК, поэтому ориентированное движение близко стационарному вращению корабля вокруг этой оси. По своим амплитудно-частотным характеристикам микроускорения на борту ТГК в этом режиме очень удачно подходят для экспериментов с датчиком конвекции ДАКОН [1, 2]. С одной стороны, они достаточно велики в области низких частот, а с другой стороны, имеют чисто дискретный спектр с небольшим числом гармоник. Это упростит анализ показаний датчика.

Для такого анализа необходимо знать реальные квазистатические микроускорения, имевшие место во время проведения экспериментов. Микроускорения можно найти расчетным путем,

реконструировав вращательное движение ТГК. Реконструкция движения, происходившего во время закруток, выполняется по телеметрическим значениям компонент угловой скорости корабля в его строительной системе координат и тока, вырабатываемого солнечными батареями [3–5]. Данные измерений, собранные на некотором интервале времени, обрабатываются совместно методом наименьших квадратов с помощью интегрирования уравнений движения ТГК относительно центра масс. В результате обработки оцениваются начальные условия движения корабля относительно направления Земля–Солнце и параметры используемых математических моделей.

Если измерения угловой скорости отсутствуют, то движение корабля в режиме солнечной закрутки можно реконструировать только по измерениям тока СБ. Точность при этом будет ниже, чем при использовании двух видов измерений, но микроускорения найти удастся. Ниже проведено исследование, поясняющее возможность реконструкции по таким малоинформативным, на первый взгляд, данным. Приведены примеры реконструкции неуправляемого вращательного движения ТГК *Прогресс М-24М* (№ 423) и *М-25М* (№ 424).

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТГК  
И ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ ТОКА  
СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ**

ТГК считается твердым телом. Для записи уравнений движения корабля относительно центра масс и соотношений, используемых при обработке данных измерений введем две правые декартовые системы координат. Строительная система  $Oy_1y_2y_3$  жестко связана с корпусом ТГК. Точка  $O$  — центр масс корабля, ось  $Oy_1$  параллельна его продольной оси и направлена от стыковочного узла к агрегатному отсеку, ось  $Oy_2$  перпендикулярна плоскости солнечных батарей (СБ). Светочувствительная сторона СБ обращена к полупространству  $y_2 > 0$ . Система  $Ox_1x_2x_3$  образована главными центральными осями инерции ТГК. Оси  $Ox_i$  составляют малые углы с осями  $Oy_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

Положение системы  $Ox_1x_2x_3$  относительно системы  $Oy_1y_2y_3$  будем задавать углами  $\gamma$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ , которые введем посредством следующего условия. Система  $Oy_1y_2y_3$  может быть переведена в систему  $Ox_1x_2x_3$  тремя последовательными поворотами. Первый поворот совершается вокруг оси  $Oy_2$  на угол  $\alpha$ . Второй поворот совершается на угол  $\beta$  вокруг оси  $Oy_3$ , полученной после первого поворота. Третий поворот совершается на угол  $\gamma$  вокруг оси  $Oy_1$ , полученной после первых двух поворотов. Такая ось  $Oy_1$  совпадает с осью  $Ox_1$ . Матрицу перехода от системы  $Ox_1x_2x_3$  к системе  $Oy_1y_2y_3$  обозначим  $\|a_{ij}\|_{i,j=1}^3$ ,  $a_{ij}$  — косинус угла между осями  $Oy_i$  и  $Ox_j$ . Элементы этой матрицы выражаются через введенные углы по известным формулам (см., например, [5]). Ниже используются только направляющие косинусы оси  $Oy_2$  в системе  $Ox_1x_2x_3$ :  $a_{21} = \sin \beta$ ,  $a_{22} = \cos \beta \cos \gamma$ ,  $a_{23} = -\cos \beta \sin \gamma$ .

Введем обозначения:  $s_i$  — компоненты орта  $S$  направления Земля—Солнце,  $\omega_i$  — компоненты абсолютной угловой скорости ТГК ( $i = 1, 2, 3$ ). Оба набора компонент относятся к системе координат  $Ox_1x_2x_3$ . Уравнения движения ТГК относительно центра масс образованы динамическими уравнениями Эйлера

$$\dot{\omega}_1 = \mu \omega_2 \omega_3, \quad \dot{\omega}_2 = \frac{\mu' - \mu}{1 - \mu\mu'} \omega_1 \omega_3, \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_3 = -\mu' \omega_1 \omega_2$$

и кинематическими уравнениями Пуассона

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= s_2 \omega_3 - s_3 \omega_2, & \dot{s}_2 &= s_3 \omega_1 - s_1 \omega_3, \\ \dot{s}_3 &= s_1 \omega_2 - s_2 \omega_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь точка над символом означает дифференцирование по времени  $t$ ,

$$\mu = \frac{J_2 - J_3}{J_1}, \quad \mu' = \frac{J_2 - J_1}{J_3}.$$

$J_i$  — моменты инерции ТГК относительно осей  $Ox_i$ . Уравнения (1), (2) являются упрощенными: в (1) не учитываются действующие на ТГК внешние механические моменты, в (2) предполагается, что направление Земля—Солнце неизменно в инерциальном пространстве. Согласно результатам [3] точность этих уравнений достаточна для описания закруток ТГК на интервалах времени несколько часов.

Если считать, что на СБ вырабатывает ток только под действием солнечных лучей, падающих на их светочувствительную поверхность, то расчетный аналог тока СБ выражается формулой

$$I = I_0(a_{21}s_1 + a_{22}s_2 + a_{23}s_3). \quad (3)$$

Здесь  $I_0$  — ток СБ при нулевом угле падения на них солнечных лучей. Соотношения (1)–(3) не содержат угла  $\alpha$ . Этот параметр по измерениям тока оценить нельзя.

Углы  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и параметры  $\mu$ ,  $\mu'$  оцениваются по измерениям угловой скорости, выполненным в режиме закрутки на Солнце. В табл. 1, взятой из [4], приведены оценки этих величин для ТГК № 423 вместе с их стандартными отклонениями. Как будет показано ниже, при обработке измерений тока СБ в принципе можно уточнить  $\mu$ ,  $\mu'$ ,  $\gamma$ , и  $\beta$ .

Данные измерений тока СБ представляют собой три ряда значений, получаемые от трех датчиков:

$$t_n, I_1^{(n)}, I_2^{(n)}, I_3^{(n)} \quad (n = 1, 2, \dots, N).$$

Здесь  $I_j^{(n)}$  — приближенное значение тока, фиксируемое в момент времени  $t_n$  датчиком с номером  $j$  ( $j = 1, 2, 3$ ),  $t_1 < t_2 < \dots < t_N$ . Показания датчиков почти одинаковы, поэтому измерением тока в момент  $t_n$  считается величина  $I_n = [I_1^{(n)} + I_2^{(n)} + I_3^{(n)}]/3$ . На отрезках времени более 15 мин величины  $I_n$  не удастся аппроксимировать выражением (3), рассчитываемым вдоль решений системы (1), (2). На таких отрезках в данных  $I_n$  проявляется низкочастотная составляющая, не связанная с вращательным движением ТГК [4, 5]. Перед реконструкцией движения она исключается (см. ниже).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ  
РЕКОНСТРУКЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТГК  
ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ТОКА  
СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ**

Движение ТГК в режиме солнечной закрутки происходит с большой угловой скоростью в окрест-

Таблица 1. Оценки параметров тензора инерции ТГК № 423 (ноябрь 2014)

$\mu$	$\sigma_\mu \cdot 10^4$	$\mu'$	$\sigma_{\mu'} \cdot 10^3$	$\gamma$	$\sigma_\gamma \cdot 10^5$	$\alpha$	$\sigma_\alpha \cdot 10^3$	$\beta$	$\sigma_\beta \cdot 10^4$
0.193	7.7	0.867	3.5	-0.0711	8.5	0.0059	2.4	-0.0033	1.8
0.182	51	0.899	25	-0.0716	56	0.0137	15	-0.0033	13
0.196	28	0.859	12	-0.0718	24	-0.0046	8.8	-0.0019	6.7
0.196	22	0.867	11	-0.0705	21	0.0072	6.9	-0.0034	5.9
0.197	27	0.863	12	-0.0727	20	0.0072	8.3	-0.0031	6.4
0.194	15	0.877	6.6	-0.0698	10	0.0100	4.6	-0.0026	3.3
0.196	46	0.863	20	-0.0729	26	-0.0026	14	-0.0026	11
0.196	54	0.834	23	-0.0725	28	0.0149	17	-0.0035	13

ности стационарного решения уравнений (1), принадлежащего семейству

$$\omega_1 = \omega_3 = 0, \quad \omega_2 = \Omega. \quad (4)$$

Здесь  $\Omega$  – произвольная постоянная, которую считаем положительной (таковы рассматриваемые ниже закрутки). Решения этого семейства описывают стационарные вращения ТГК вокруг его главной центральной оси максимального момента инерции. Общее решение уравнений (1), лежащих в окрестности стационарного решения (4) можно описать приближенными формулами

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_1 &= \lambda(A \sin vt + B \cos vt), \quad \hat{\omega}_2 = \Omega + \Delta \hat{\omega}_2, \\ \Delta \hat{\omega}_2 &= \frac{\mu' - \mu}{4\Omega\mu'(1 - \mu\mu')} \cdot \\ &\cdot [2AB \sin 2vt - (A^2 - B^2) \cos 2vt], \\ \hat{\omega}_3 &= A \cos vt - B \sin vt, \quad \lambda = \sqrt{\frac{\mu}{\mu'}}, \quad v = \Omega\sqrt{\mu\mu'}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $A$ ,  $B$  и  $\Omega$  – произвольные постоянные,  $A^2 + B^2 \ll \Omega^2$ . На ограниченном отрезке времени погрешность этих формул составляет  $O(|A|^3 + |B|^3)$  для  $\omega_1$ ,  $\omega_3$  и  $O(A^4 + B^4)$  для  $\omega_2$ .

Уравнения (2) системы (1), (2) имеют точное решение

$$\begin{aligned} s_1 &= \frac{1 - \mu'}{G} \omega_1, \quad s_2 = \frac{1 - \mu\mu'}{G} \omega_2, \quad s_3 = \frac{1 - \mu}{G} \omega_3, \\ G^2 &= (1 - \mu')^2 \omega_1^2 + (1 - \mu\mu')^2 \omega_2^2 + (1 - \mu)^2 \omega_3^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $G^2$  – первый интеграл уравнений (1). Это решение описывает движение орта кинетического момента вращательного движения ТГК в системе координат  $Ox_1x_2x_3$ . В начале движения ТГК в режиме закрутки на Солнце орт его кинетического момента направлен почти по орту  $S$  Земля–Солнце. В решении (6) и решении уравнений (2), опи-

сывающем движение орта  $S$ , выполнены соотношения  $s_2 \approx 1$ ,  $|s_1| \ll 1$ ,  $|s_3| \ll 1$ . Положим  $s_2 = 1 + \Delta s_2$ , где вследствие соотношения

$$s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 = 1 \quad (7)$$

имеем  $\Delta s_2 \approx -(s_1^2 + s_3^2)/2$ . Переменные  $s_1$ ,  $s_3$  и  $\Delta s_2$  определяются приближенными уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 + \Omega s_3 &= \hat{\omega}_3, \quad \dot{s}_3 - \Omega s_1 = -\hat{\omega}_1, \\ \Delta \dot{s}_2 + s_3 \hat{\omega}_1 - s_1 \hat{\omega}_3 &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

которые получены подстановкой формул (5) в уравнения (2) и выделением главных членов.

Соотношения (6) позволяют выписать частное решение неоднородной системы (8) и найти согласованное с условием (7) постоянное слагаемое в  $\Delta s_2$ :

$$\begin{aligned} s_1^* &= \frac{(1 - \mu')\hat{\omega}_1}{(1 - \mu\mu')\Omega}, \quad s_3^* = \frac{(1 - \mu)\hat{\omega}_3}{(1 - \mu\mu')\Omega}, \\ \Delta s_2^* &= \frac{\Delta \hat{\omega}_2}{\Omega} - \frac{\lambda(1 - \mu')^2 + (1 - \mu)^2}{4\Omega^2(1 - \mu\mu')^2} (A^2 + B^2). \end{aligned} \quad (9)$$

Общее ненормированное решение однородной системы (8) имеет вид

$$\begin{aligned} s_1^\circ &= c_1 \cos \Omega t - c_2 \sin \Omega t, \\ s_3^\circ &= c_1 \sin \Omega t + c_2 \cos \Omega t, \\ \Delta s_2^\circ &= \frac{\lambda - 1}{2(\Omega - v)} [(Ac_1 + Bc_2) \sin(\Omega - v)t + \\ &+ (Ac_2 - Bc_1) \cos(\Omega - v)t] - \\ &- \frac{\lambda + 1}{2(\Omega + v)} [(Ac_1 - Bc_2) \sin(\Omega + v)t + \\ &+ (Ac_2 + Bc_1) \cos(\Omega + v)t] + c_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$  – произвольные постоянные. Решение уравнений (2), описывающее движение орта  $S$  в системе координат  $Ox_1x_2x_3$  в начале ориентированного движения, приближенно выража-

ется линейной комбинацией решений (9), (10), причем вклад решения (9) доминирует.

Согласно формуле (3) телеметрические значения тока СБ содержат гармоники с частотами  $\Omega$ ,  $\Omega \pm \nu$ ,  $\nu$  и  $2\nu$ . Частоты  $\Omega$  и  $\nu$  входят в (3) через  $s_1$  и  $s_3$ . Им отвечают амплитуды:

$$\sqrt{c_1^2 + c_2^2} \text{ в } s_1 \text{ и } s_3, \frac{\lambda(1-\mu')\sqrt{A^2 + B^2}}{(1-\mu\mu')\Omega} \text{ в } s_1, \\ \frac{(1-\mu)\sqrt{A^2 + B^2}}{(1-\mu\mu')\Omega} \text{ в } s_3.$$

Частоты  $\Omega - \nu$  и  $\Omega + \nu$  входят в выражение (3) через  $s_2$  с амплитудами

$$\frac{1-\lambda}{2(\Omega-\nu)}\sqrt{(A^2+B^2)(c_1^2+c_2^2)} \\ \text{и } \frac{1+\lambda}{2(\Omega+\nu)}\sqrt{(A^2+B^2)(c_1^2+c_2^2)}.$$

Частота  $2\nu$  также входит через  $s_2$ , но ей отвечает малая амплитуда. Из сказанного следует, что, выполнив спектральный анализ телеметрических значений тока СБ, можно найти частоты  $\Omega$ ,  $\nu$  и величину  $\sqrt{\mu\mu'} = \nu/\Omega$ . Отношение  $R$  амплитуд с частотами  $\Omega - \nu$  и  $\Omega + \nu$  имеет вид

$$R = \frac{1-\lambda}{1+\lambda} \cdot \frac{\Omega+\nu}{\Omega-\nu}.$$

Найдя это отношение из периодограмм, можно оценить

$$\lambda = \frac{1-R'}{1+R'}, \quad R' = R \frac{\Omega-\nu}{\Omega+\nu},$$

и найти  $\mu = \lambda\sqrt{\mu\mu'}$  и  $\mu' = \sqrt{\mu\mu'}/\lambda$ . Далее, анализируя гармоники с частотами  $\Omega$  и  $\nu$ , можно найти отношения  $\Omega\sqrt{c_1^2 + c_2^2}/\sqrt{A^2 + B^2}$ ,  $c_1/c_2$  и  $A/B$  и т.д. Таким образом, телеметрические значения тока СБ содержат достаточно богатую информацию о движении ТГК в режиме закрутки на Солнце, причем даже сравнительно простой анализ позволяет получить некоторые оценки, связанные с таким движением. Применение спектрального анализа этим не ограничивается: он позволяет устранить низкочастотную составляющую в значениях тока.

Приведем основные соотношения используемого спектрального анализа [6]. Пусть  $I_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) – исследуемые данные измерений. Значение  $I_n$  отвечает моменту времени (точке)  $t_n$ , причем  $0 = t_1 < t_2 < \dots < t_N$ . Для большинства соседних точек  $t_{n+1} - t_n \approx 1$  с, но иногда в данных

встречаются пропуски. Сначала из исследуемых данных выделяются отдельные гармонические составляющие (гармоники). С этой целью данные аппроксимируются функцией

$$I(t) = a_0 + a \cos 2\pi ft + b \sin 2\pi ft, \quad (11)$$

где  $a_0$ ,  $a$ ,  $b$  и  $f$  – параметры. Значения параметров разыскиваются методом наименьших квадратов. Составим выражение

$$\Psi = \sum_{n=1}^N [I_n - I(t_n)]^2. \quad (12)$$

Согласно методу наименьших квадратов определение параметров  $a_0$ ,  $a$ ,  $b$  и  $f$  сводится к минимизации по ним выражения (12).

Функция  $\Psi = \Psi(a_0, a, b, f)$  имеет, как правило, много локальных минимумов, поэтому ее минимизация проводится поэтапно. Сначала в результате решения ряда одинаковых линейных задач наименьших квадратов вычисляются значения функции

$$\Psi_1(f) = \min_{a_0, a, b} \Psi(a_0, a, b, f)$$

в узлах достаточно мелкой равномерной сетки на отрезке  $0 \leq f \leq F$ , строится график этой функции, и находятся приближенные значения точек минимума. Значения  $f$  для достаточно значимых (по величине  $\Psi_1$ ) минимумов являются частотами искомым гармоник. В случае  $t_{n+1} - t_n = 1$  с для полного анализа данных надо взять  $F = 0.5$  Гц, но в данной задаче оказалось возможным принять  $F = 0.025$  Гц. Пусть описанным способом найдены частоты  $f_k$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ;  $M \ll N$ ). Отвечающий этим частотам тренд ищем в виде

$$I(t) = a_0 + \sum_{k=1}^M (a_k \cos 2\pi\lambda_k t + b_k \sin 2\pi\lambda_k t), \quad (13)$$

где  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  и  $\lambda_k \approx f_k$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ) – постоянные параметры. Значения этих параметров находятся минимизацией функции, заданной соотношениями (12), (13). В минимизации этой функции состоит второй этап поиска гармоник, содержащихся в телеметрических значениях тока СБ. Решаемая на втором этапе задача метода наименьших квадратов является нелинейной. Ее решение находилось методом Гаусса–Ньютона [7]. Начальным приближением служили значения частот  $\lambda_k = f_k$  и значения коэффициентов  $a_k$ ,  $b_k$ , определяемых из линейной задачи метода наименьших квадратов (12), (13) при указанном начальном наборе частот.

Чтобы проверить результат первого этапа, наряду с функцией  $\Psi_1(f)$  рассматривалась функция

$$P(f) = \left[ \sum_{n=1}^N (I_n - \bar{I}) \cos 2\pi f t_n \right]^2 + \left[ \sum_{n=1}^N (I_n - \bar{I}) \sin 2\pi f t_n \right]^2, \\ \bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n,$$

называемая периодограммой Шустера. Пусть исследуемая функция  $I(t)$  имеет вид (13). Тогда  $a_0 = \bar{I}$ , периодограмма имеет локальные максимумы в точках  $f_k \approx \lambda_k$ , причем  $a_k^2 + b_k^2 \approx 4P(f_k)N^{-2}$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ). Точность выписанных соотношений увеличивается с ростом  $N$ . Таким образом, исследование максимумов периодограммы позволяет получить оценки частот и амплитуд гармонических составляющих функции  $I(t)$ .

Ниже для наглядности вместо графиков функций  $\Psi_1(f)$  и  $I(f)$  приводятся графики функций

$$E(f) = \sqrt{\frac{\Psi_1(f)}{N-3}}, \quad A(f) = \frac{2}{N} \sqrt{P(f)}. \quad (14)$$

Минимумы функции  $E(f)$  дают оценки среднеквадратичной ошибки аппроксимации функции  $x(t)$  выражением (11), максимумы функции  $A(f)$  — оценки амплитуды  $\sqrt{a^2 + b^2}$ .

Результаты спектрального анализа данных измерений тока СБ, а также результаты предваряющего этот анализ исключения из данных измерений низкочастотной составляющей приведены на рис. 1, 3, 5 и 7. Все рисунки в данной работе сгруппированы по отрезкам измерений, поэтому нумерация рисунков, относящихся к спектральному анализу, не является сплошной. Преобразованию и анализу были подвергнуты отрезки данных, основные характеристики которых приведены в табл. 2. Для каждого отрезка в таблице указаны его номер, начальная точка  $t_1$  (дата и время), продолжительность  $t_N - t_1$ , число  $N$  включенных в обработку моментов времени с измерениями и некоторые результаты обработки. Началом отсчета времени  $t$  на всех рисунках данной работы служит точка  $t_1$ .

Подготовка данных для спектрального анализа и реконструкции движения состояла в их предварительной коррекции. Из измерений тока исключалась составляющая, которая, по-видимому, обусловлена светом, отраженным от земной поверхности. Эту составляющую трудно выделить точно. Приближенное выделение основано на частотных соображениях. Составляющая, обу-

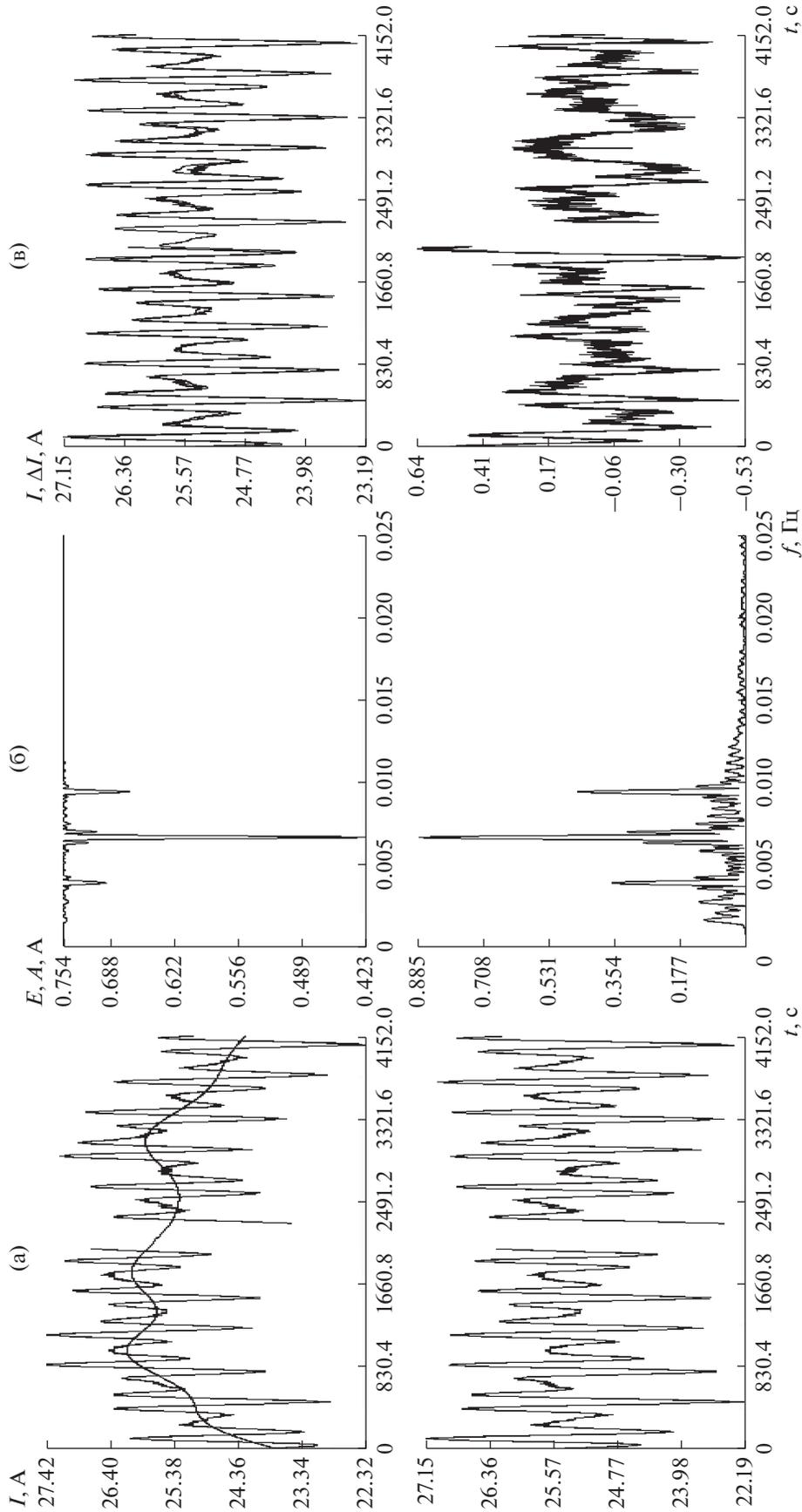
словленная отраженным от Земли светом, — низкочастотная. Она довольно сложно зависит от времени, и в ее представлении рядом Фурье необходимо учесть несколько гармоник с частотами, кратными  $\omega_{\text{осв}} = \pi/(t_N - t_1)$ . Здесь  $[t_1, t_N]$  — обрабатываемый интервал времени с измерениями, его длина не превышает времени полета ТГК по освещенному участку орбиты. Составляющая тока, обусловленная прямым солнечным светом, — высокочастотная. Ее основные частоты  $\Omega$ ,  $\nu$  и  $\Omega \pm \nu$  существенно больше  $\omega_{\text{осв}}$ . В такой ситуации составляющую, обусловленную отраженным от Земли светом, можно выделить с помощью низкочастотной фильтрации.

Использованный способ фильтрации состоял в следующем. Сначала строилась аппроксимация низкочастотной составляющей с помощью выражения (конечного ряда Фурье)

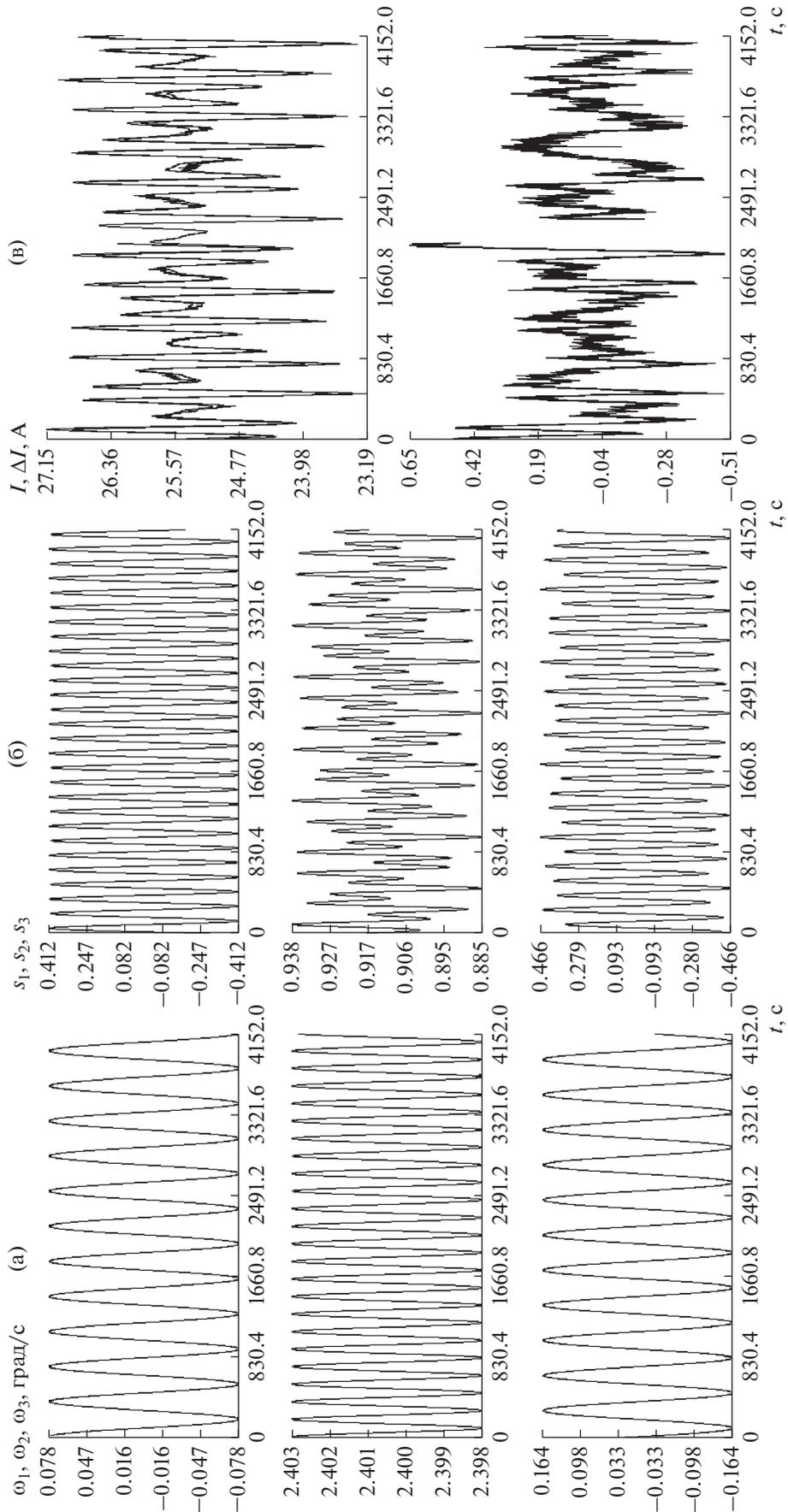
$$\chi(t) = a_{M+1} + a_{M+2}(t - t_1) + \sum_{m=1}^M a_m \sin \frac{\pi m(t - t_1)}{t_N - t_1}, \quad (15)$$

коэффициенты которого  $a_1, a_2, \dots, a_{M+2}$  наилучшим образом в смысле метода наименьших квадратов сглаживают точки  $(t_n, I_n)$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ . Графики этих выражений изображены плавными линиями в верхней части перечисленных рисунков, имеющих индекс (а). В тех же системах координат изображены графики исходных данных. Они представляют собой ломаные, звенья которых соединяют соседние по времени точки  $(t_n, I_n)$ . Число  $M$  в (15) выбиралось методом проб и ошибок для каждого отрезка данных. Правила выбора приведены ниже. Окончательное значение этого числа, при котором построено используемое в дальнейшей обработке выражение (15), приведено в табл. 2.

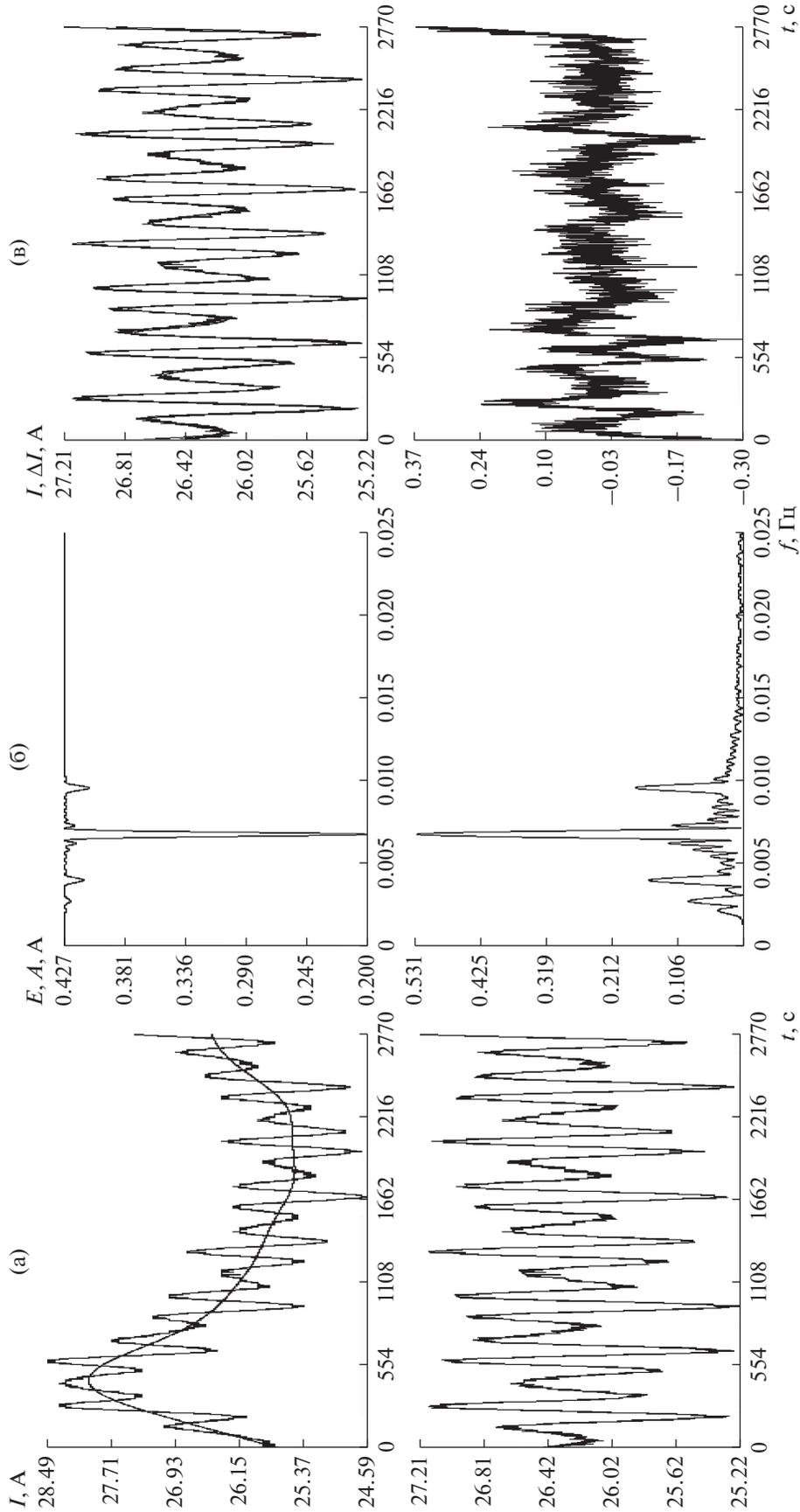
Выбор  $M$  контролировался спектральным анализом. Для пробного выражения (13) вычислялось его среднее значение  $\langle \chi \rangle$  на сетке  $\{t_n\}$ . Функция  $\chi(t) - \langle \chi \rangle$  считалась той посторонней составляющей, которую следует удалить из данных измерений. Удаление состояло в замене величин  $I_n$  величинами  $I_n - \chi(t_n) + \langle \chi \rangle$  с сохранением прежних обозначений. Примеры ломаных, проходящих через новые точки  $(t_n, I_n)$ , приведены в нижней части рисунков с индексом (а). Для модифицированных таким образом значений тока вычислялись периодограммы (14). Примеры графиков этих периодограмм приведены на рисунках с индексом (б). На графиках видны несколько значимых пиков (минимумов функции  $E(f)$  и максимумов функции  $A(f)$ ), отвечающих гармоническим составляющим в данных измерений. Выделялись 4 наиболее значимых пика. Частоты



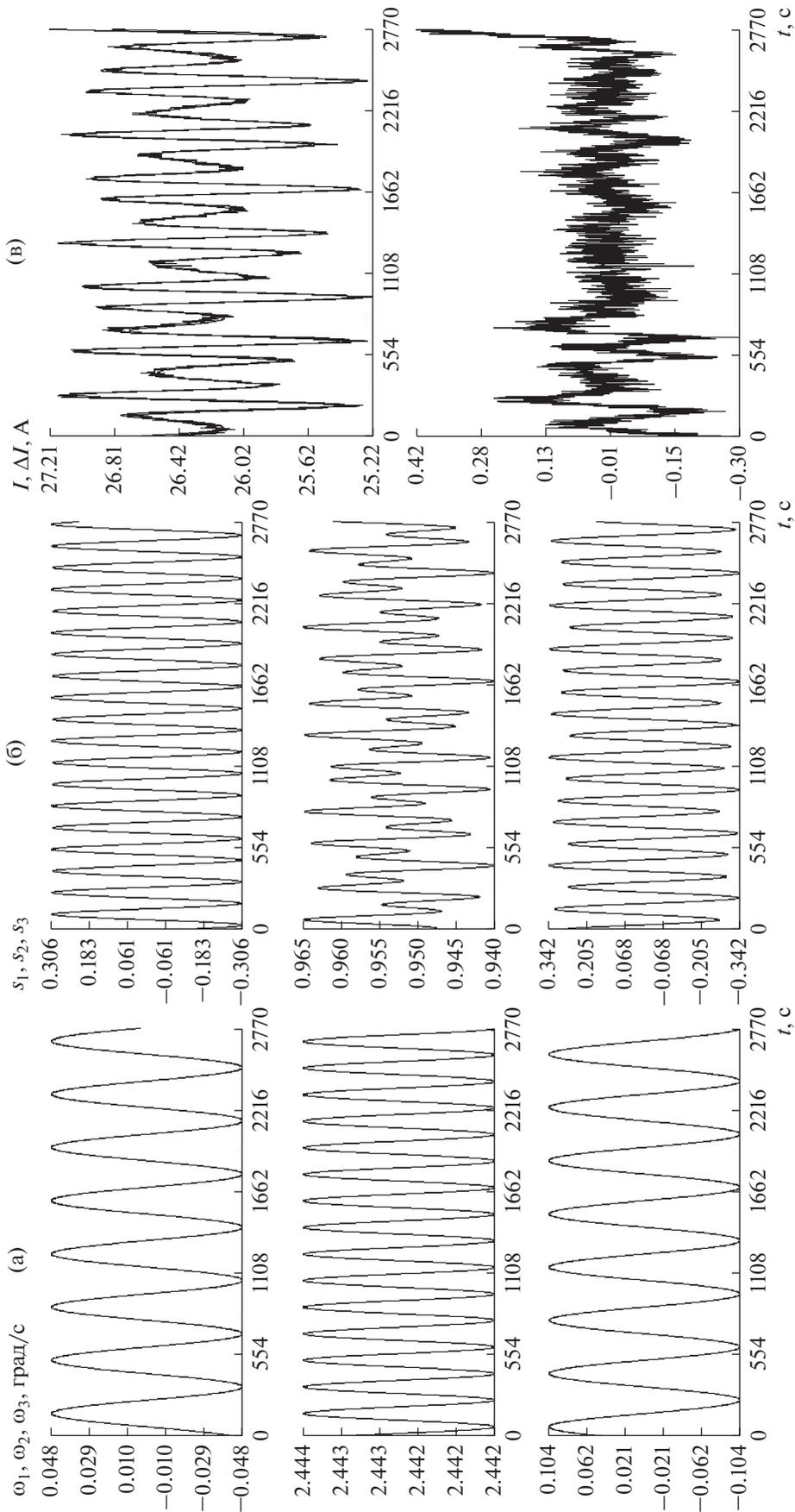
**Рис. 1.** Коррекция и спектральный анализ измерений на интервале 1; (а) удаление низкочастотной составляющей ( $M = 12$ ), (б) спектры скорректированных измерений, (в) аппроксимация измерений суммой гармоник с частотами 0.00277, 0.00391, 0.00668, 0.00945 Гц и амплитудами 0.13, 0.33, 0.85, 0.42 А, СКО = 0.18 А. Оценки параметров модели:  $\Omega = 2.40$  град/с,  $\mu = 0.210$ ,  $\mu' = 0.822$ .



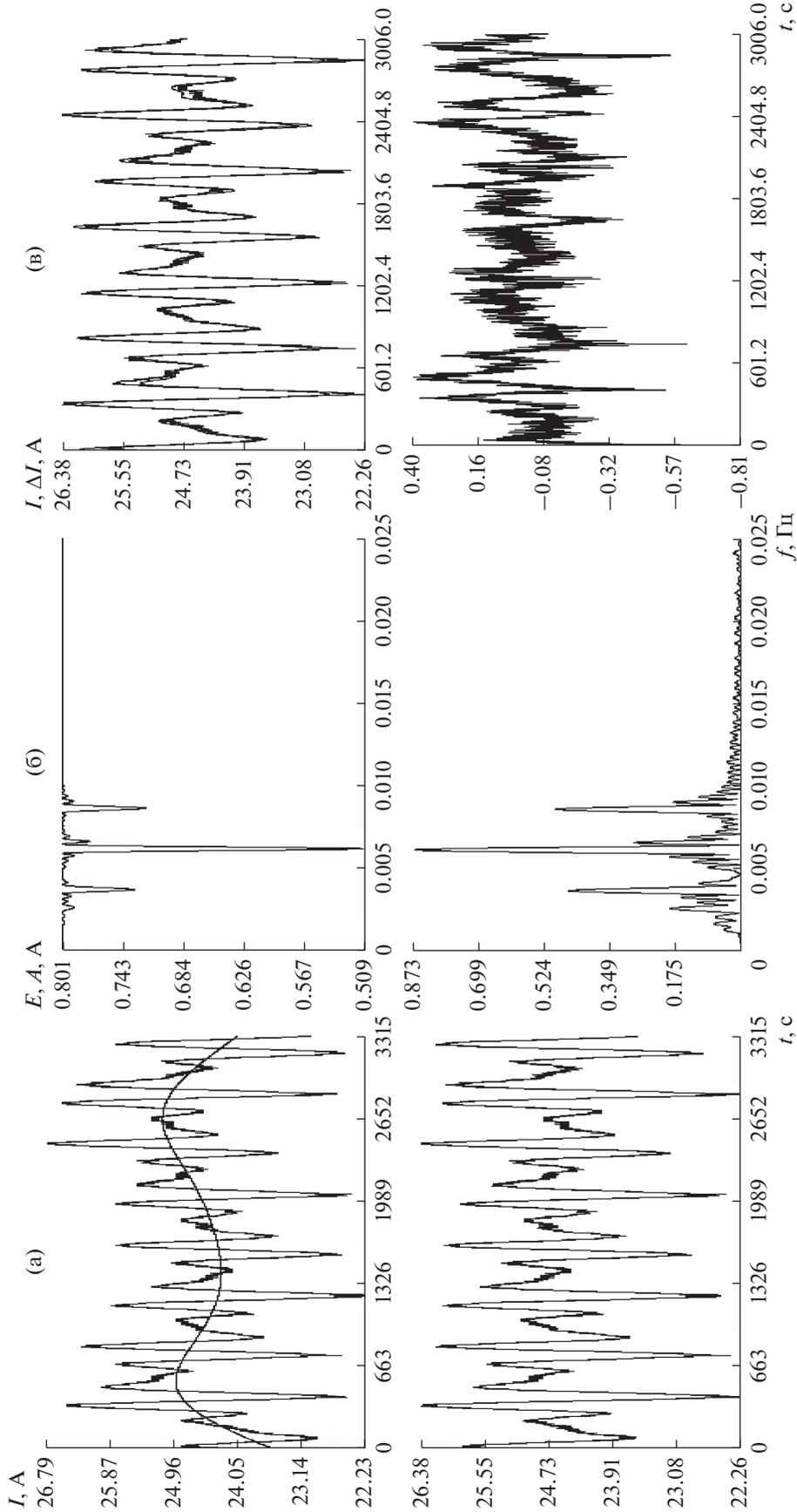
**Рис. 2.** Результаты обработки скорректированных измерений тока на интервале 1; (а), (б) решение системы (1), (2), (в) аппроксимация измерений,  $\sigma = 0.18$  А. Оценки параметров модели:  $\mu = 0.199$ ,  $\mu' = 0.868$ ,  $I_0 = 27.9$  А,  $\gamma = -0.075$ .



**Рис. 3.** Коррекция и спектральный анализ измерений на интервале 2; (а) удаление низкочастотной составляющей ( $M = 10$ ), (б) спектры скорректированных измерений, (в) аппроксимация измерений суммой гармоник с частотами 0.00271, 0.00403, 0.00678, 0.00958 Гц амплитудами 0.078, 0.62, 0.54, 0.19 А, СКО = 0.077 А. Оценки параметров модели:  $\Omega = 2.44$  град/с,  $\mu = 0.189$ ,  $\mu' = 0.884$ .



**Рис. 4.** Результаты обработки скорректированных измерений тока на интервале 2; (а), (б) решение системы (1), (2), (в) аппроксимация измерений,  $\sigma = 0.083$  А. Оценки параметров модели:  $\mu = 0.188$ ,  $\mu' = 0.886$ ,  $I_0 = 27.7$  А,  $\gamma = -0.065$ .



**Рис. 5.** Коррекция и спектральный анализ измерений на интервале 3; (а) удаление низкочастотной составляющей ( $M = 8$ ), (б) спектры скорректированных измерений, (в) аппроксимация измерений суммой гармоник с частотами 0.00255, 0.00370, 0.00616, 0.00860 Гц амплитудами 0.017, 0.45, 0.87, 0.49 А, СКО = 0.15 А. Оценки параметров модели:  $\Omega = 2.22$  град/с,  $\mu = 0.174$ ,  $\mu' = 0.908$ .

Таблица 2. Результаты обработки измерений тока на ТГК № 423 (ноябрь 2014) и № 424 (апрель 2015)

№ инт.	Дата	$t_1$ (ДМВ)	$t_N - t_1$ , с	$N$	$M$	$\sigma, A$	$\omega_{10}$	$\omega_{20}$	$\omega_{30}$	$\sigma_{\omega 1}$	$\sigma_{\omega 2}$	$\sigma_{\omega 3}$
							$(10^{-3} \text{ с}^{-1})$			$(10^{-6} \text{ с}^{-1})$		
1	1.XI.2014	09:40:28	4152	3893	12	0.177	1.336	41.942	0.582	22	21	39
2	17.XI.2014	21:34:17	2770	2725	10	0.083	-0.759	42.644	0.741	14	36	32
3	26.IV.2015	00:40:46	3315	3309	8	0.188	-0.412	38.575	-3.285	22	51	47
4	26.IV.2015	02:10:47	3321	3322	9	0.157	-0.929	38.692	0.804	20	26	33
5	26.IV.2015	00:40:46	8722	6631	-	0.183	-0.466	38.657	-3.061	14	17	33

№ инт.	$\mu$	$\sigma_\mu \cdot 10^4$	$\mu'$	$\sigma_{\mu'} \cdot 10^3$	$z_1 \cdot 10^4$	$\sigma_{z_1} \cdot 10^4$	$z_2 \cdot 10^4$	$\sigma_{z_2} \cdot 10^4$	$A_2, A$	$\sigma_{A_2}, A$	$A_3, A$	$\sigma_{A_3}, A$
1	0.199	1.3	0.869	28	-1707	28	-1165	25	27.84	0.073	2.09	0.029
2	0.188	2.5	0.886	47	-662	16	1497	24	27.60	0.044	1.79	0.028
3	0.186	1.8	0.861	15	1031	20	1406	31	26.94	0.060	2.13	0.026
4	0.171	1.4	0.927	28	-2711	50	-7	24	28.48	0.15	1.73	0.028
5	0.185	0.46	0.858	51	1185	15	1324	21	26.69	0.044	2.13	0.019

пиков обозначим  $f_k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ). Нумерация частот определяется соотношениями  $2\pi f_1 \approx v$ ,  $2\pi f_2 \approx \Omega - v$ ,  $2\pi f_3 \approx \Omega$ ,  $2\pi f_4 \approx \Omega + v$ . Для определяемых движений  $f_1 < f_2 < f_3 < f_4$ . Число  $M$  в (15) выбиралось максимальным среди тех чисел, что оставляли на периодограммах не менее четырех значимых пиков. Пикам приписывались частоты  $f_1, f_2, \dots$ . При этом учитывались следующие обстоятельства. Во-первых, описанное преобразование измерений с помощью выражения (15) практически исключает из измерений составляющие с частотами меньше  $M[2(t_N - t_1)]^{-1}$ . Во-вторых, наиболее значимый пик отвечает частоте  $f_3 \approx \Omega/2\pi$ . В-третьих, должны выполняться указанные выше приближенные соотношения для частот  $f_1, f_2$  и  $f_4$ , рассчитываемые по найденному из периодограмм значению  $f_3$  и проектному значению  $\sqrt{\mu\mu'}$ .

Значения частот  $f_k$ , найденные по периодограммам, уточнялись при построении аппроксимации измерений выражением (13). Графики этих выражений приведены плавными линиями в верхней части рассматриваемых рисунков, имеющих индекс (в). В одних системах координат с ними изображены графики аппроксимируемых данных – ломаные, звенья которых соединяют соседние по времени точки  $(t_n, I_n)$ . В нижней части рисунков (в) приведены графики ошибок аппроксимации – ломаные с вершинами в точках  $(t_n, I_n - I(t_n))$ . По уточненным частотам  $\lambda_1, \dots, \lambda_4$  найдены оценки величин  $\Omega, \mu$  и  $\mu'$ . Эти оценки, а также частоты  $\lambda_k$  и амплитуды  $\sqrt{a_k^2 + b_k^2}$  приведены в подписях к рисункам. Частоты выражены в герцах, амплитуды – в амперах.

### РЕКОНСТРУКЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ТГК ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ТОКА СБ

Значения угла  $\beta$  малы (см. табл. 1) и оцениваются с большой ошибкой. В такой ситуации целесообразно положить в (3)  $\beta = 0$ . Тогда

$$I = A_2 s_2 + A_3 s_3, \quad A_2 = I_0 \cos \gamma, \quad (16)$$

$$A_3 = -I_0 \sin \gamma,$$

где  $\gamma$  – угол между осями  $Ox_2$  и  $Oy_2$ . Реконструкцией движения ТГК по скорректированным измерениям тока СБ будем считать решение системы (1), (2), доставляющее минимум функционалу

$$\Phi = \sum_{n=1}^N [I_n - A_2 s_2(t_n) - A_3 s_3(t_n)]^2. \quad (17)$$

Минимизация выполняется по начальным условиям решения и параметрам  $\mu, \mu', A_2, A_3$ . Начальные условия для уравнений (1) обозначим  $\omega_{i0} = \omega_i(t_1)$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Решения уравнений (2) должны удовлетворять условию (7). Это условие выполняется при всех  $t$ , если оно выполнено в начальной точке  $t_1$ . По этой причине начальные условия переменных  $s_i$  выражались через независимые параметры  $z_1$  и  $z_2$  по формулам

$$s_1(t_1) = \frac{2z_1}{1 + z_1^2 + z_2^2}, \quad s_2(t_1) = \frac{1 - z_1^2 - z_2^2}{1 + z_1^2 + z_2^2},$$

$$s_3(t_1) = \frac{2z_2}{1 + z_1^2 + z_2^2}.$$

В большинстве случаев использования режима закрутки на Солнце  $|z_1| \ll 1, |z_2| \ll 1$ , и такую параметризацию можно приближенно представить в

виде  $s_1 \approx 2z_1$ ,  $s_2 \approx 1$ ,  $s_3 \approx 2z_2$ . Последние соотношения поясняют смысл параметров  $z_1$  и  $z_2$ .

Функционал (17) зависит от 9 величин:  $\omega_{10}$ ,  $\omega_{20}$ ,  $\omega_{30}$ ,  $\mu$ ,  $\mu'$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ . Так система (1), (2) выдерживает замену переменных

$$\omega_1 \rightarrow -\omega_1, \quad \omega_3 \rightarrow -\omega_3, \quad s_1 \rightarrow -s_1, \quad s_3 \rightarrow -s_3,$$

то наборы параметров  $\pm\omega_{10}$ ,  $\omega_{20}$ ,  $\pm\omega_{30}$ ,  $\mu$ ,  $\mu'$ ,  $\pm z_1$ ,  $\pm z_2$ ,  $A_2$ ,  $\pm A_3$ , в которых берутся только верхние или только нижние знаки, задают равные значения  $\Phi$ . Вследствие этого минимум функционала (17) не единствен. Выбор знаков основан на последней формуле (16). Угол  $\gamma$  не превышает  $10^\circ$  и его оценки достаточно надежны, поэтому в нужной точке минимума  $\Phi$  знак  $A_3$  должен быть противоположен знаку  $\gamma$ .

Функционал (17) можно упростить. В уравнения (2) вместо решения уравнений (1) подставим формулы (5) и будем рассматривать  $\Phi$  как функцию величин  $A$ ,  $B$ ,  $\Omega$ ,  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ . Такое упрощение использовалось для поиска начального приближения точки минимума  $\Phi$ .

Минимизация функционала (17) выполнялась методом Левенберга–Марквардта [7]. В некоторых случаях на начальном этапе минимизировался функционал  $\Phi + \varepsilon[(\mu - \mu_0)^2 + (\mu' - \mu'_0)^2]$  с априорными оценками  $\mu_0$ ,  $\mu'_0$  параметров  $\mu$ ,  $\mu'$  и  $\varepsilon > 0$ . На последнем этапе регуляризирующее слагаемое отбрасывалось. Метод Гаусса–Ньютона на последнем этапе в большинстве случаев расходился, и за оценку точки минимума принимался результат, полученный методом Левенберга–Марквардта.

Точность аппроксимации скорректированных измерений тока и оценок уточняемых параметров характеризовались в рамках метода наименьших квадратов соответствующими стандартными отклонениями. Пусть  $\Phi_{\min}$  – значения функционала (17) в точке минимума,  $C$  – вычисленная в этой точке матрица системы нормальных уравнений, используемых в методе Гаусса–Ньютона (матрица  $2C$  приближенно равна матрице квадратичной формы  $d^2\Phi$ ). Тогда формулы стандартного отклонения  $\sigma$  ошибок в измерениях и ковариационной матрицы  $K$  уточняемых параметров можно записать в виде

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Phi_{\min}}{N-9}}, \quad K = \sigma^2 C^{-1}.$$

Стандартные отклонения уточняемых параметров – квадратные корни из соответствующих диагональных элементов матрицы  $K$  – обозначим  $\sigma_{\omega_1}$ ,  $\sigma_{\omega_2}$ ,  $\sigma_{\omega_3}$ ,  $\sigma_{\mu}$ ,  $\sigma_{\mu'}$ ,  $\sigma_{z_1}$ ,  $\sigma_{z_2}$ ,  $\sigma_{A_2}$ ,  $\sigma_{A_3}$ .

Результаты обработки скорректированных измерений тока приведены в табл. 2 и на рис. 2, 4, 6

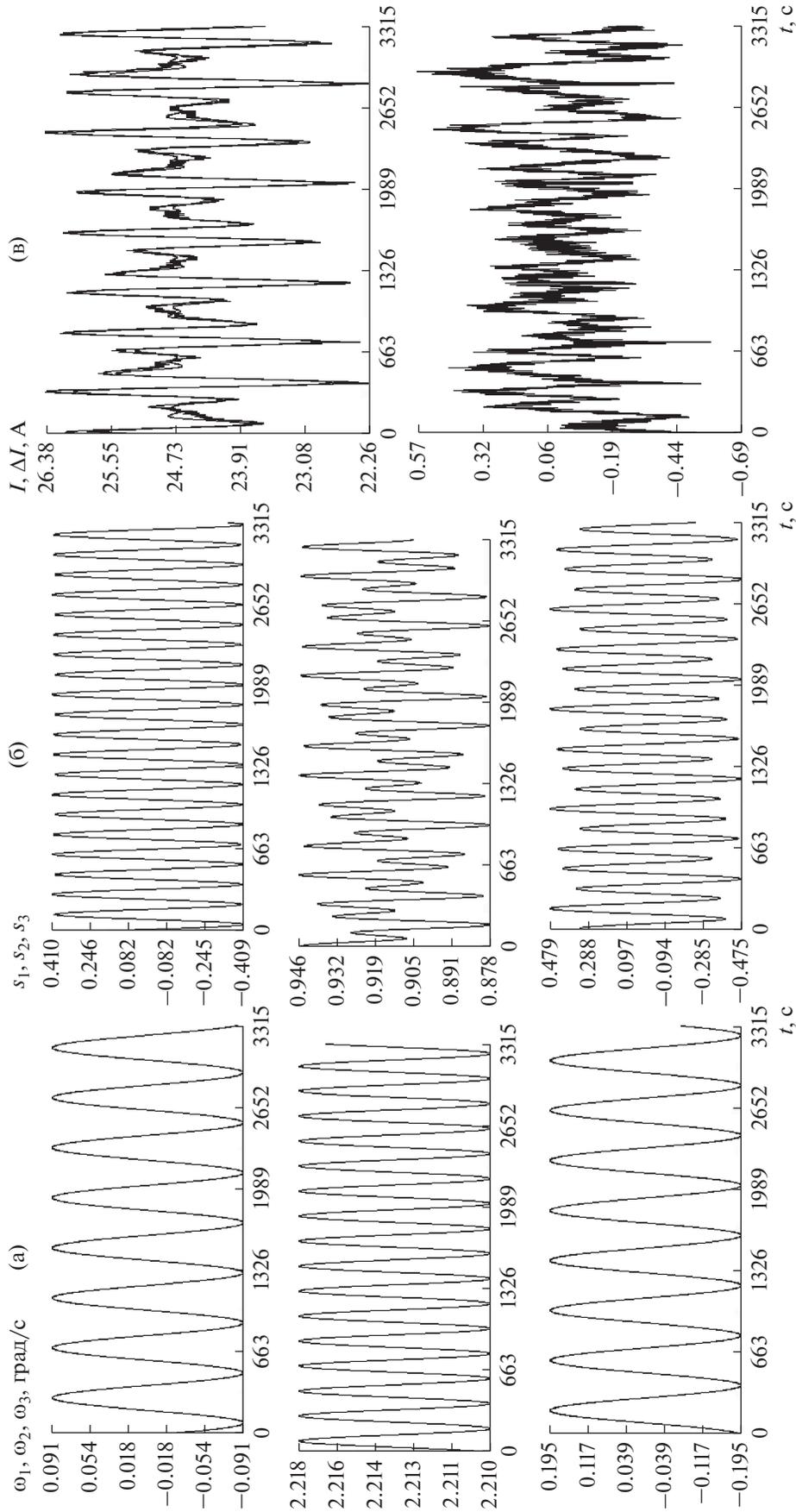
и 8. Таблица 2 содержит оценки параметров  $\omega_{10}$ ,  $\omega_{20}$ ,  $\omega_{30}$ ,  $\mu$ ,  $\mu'$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и их стандартные отклонения для каждого обработанного отрезка данных, рисунки иллюстрируют найденные реконструкции движения ТГК на интервалах времени  $t_1 \leq t \leq t_N$ . Измерения тока на интервале 5 получены объединением скорректированных измерений на интервалах 3 и 4. Рисунки для него не представлены – они выглядят как объединение соответствующих рисунков для интервалов 3 и 4.

На перечисленных рисунках с индексом (а) приведены графики решений системы (1), на рисунках с индексом (б) – графики решений системы (2). На рисунках с индексом (в) приведены найденные аппроксимации измерений тока. В верхней части этих рисунков плавными линиями изображены графики функции  $\hat{I}(t) = A_2 s_2(t) + A_3 s_3(t)$ ,  $t_1 \leq t \leq t_N$ . В тех же системах координат изображены графики скорректированных измерений. Они представляют собой ломаные, звенья которых соединяют соседние по времени точки  $(t_n, I_n)$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ . Графики почти сливаются, поэтому в нижней части рисунков (в) изображены графики ошибок аппроксимации – ломаные с вершинами в точках  $(t_n, I_n - \hat{I}(t_n))$ . В подписях к рисункам повторены некоторые данные из табл. 2.

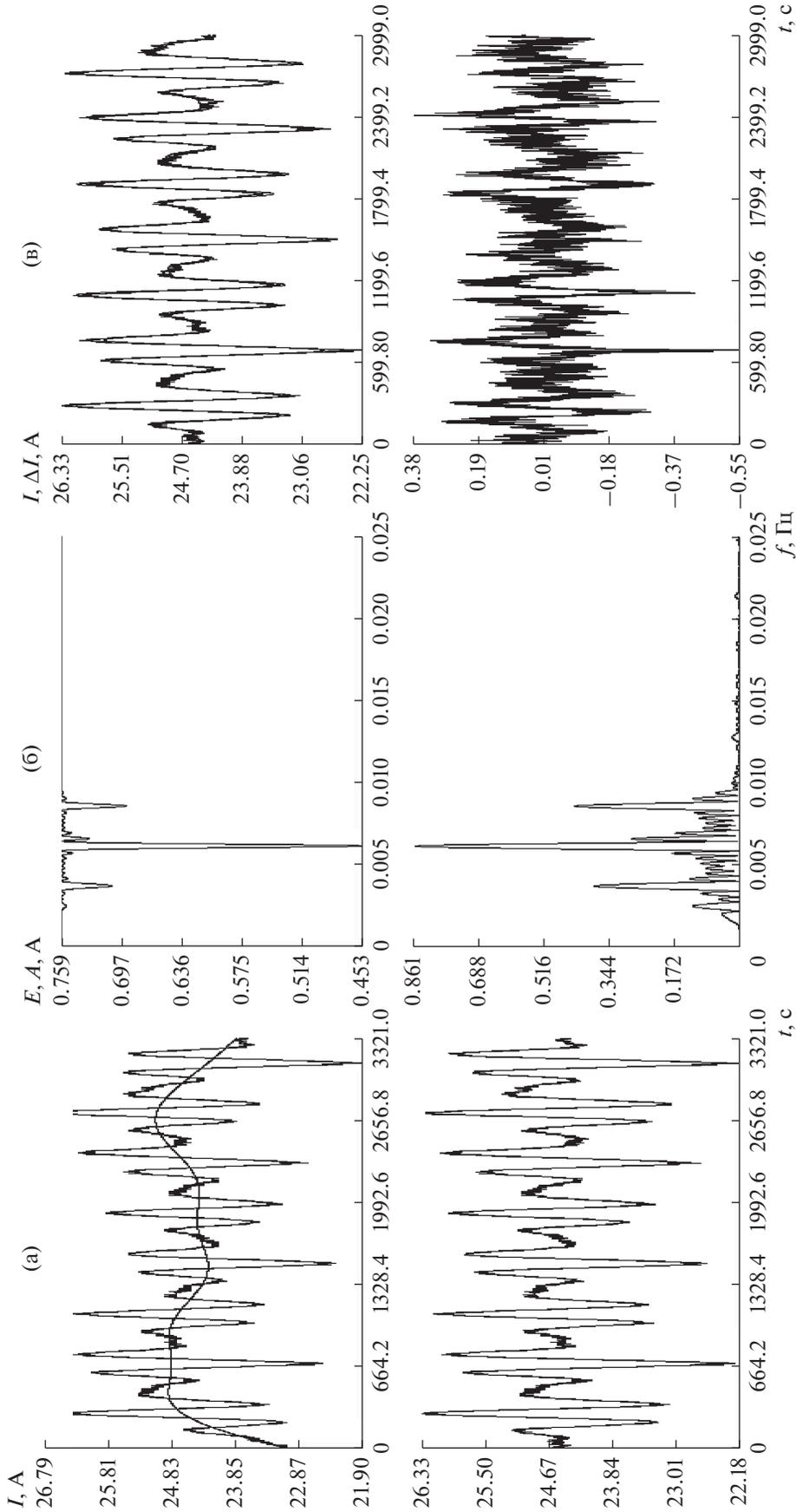
По поводу рисунков (в) необходимо отметить, что описанная в п. 3 коррекция измерений тока сохраняет их среднее значение по обрабатываемому интервалу. Но если из данных измерений удаляется низкочастотная составляющая, обусловленная отраженным от Земли светом, то при коррекции следовало бы уменьшить это среднее. Например, принять в качестве удаляемой составляющей функцию  $\chi(t) - \langle \chi \rangle + \text{const}$ ,  $\text{const} > 0$ . Однако значение  $\text{const}$  неизвестно, поэтому было принято нулем. В определенной степени этот недостаток компенсируется тем, что параметры  $A_2$  и  $A_3$  уточняются.

Как видим, аппроксимация измерений получилась правдоподобной, оценки параметров  $\mu$  и  $\mu'$  близки значениям в табл. 1. Оценки параметров  $A_2$ ,  $A_3$  позволяют найти  $I_0 = \sqrt{A_2^2 + A_3^2}$  и  $\gamma = -\text{arctg}(A_3/A_2)$ . Оценки  $I_0$  получаются достаточно близкими к априорному значению  $I_0 = 28$  А, оценки  $\gamma$  близки к значениям в табл. 1 (см. подписи к рис. 2, 4, 6 и 8).

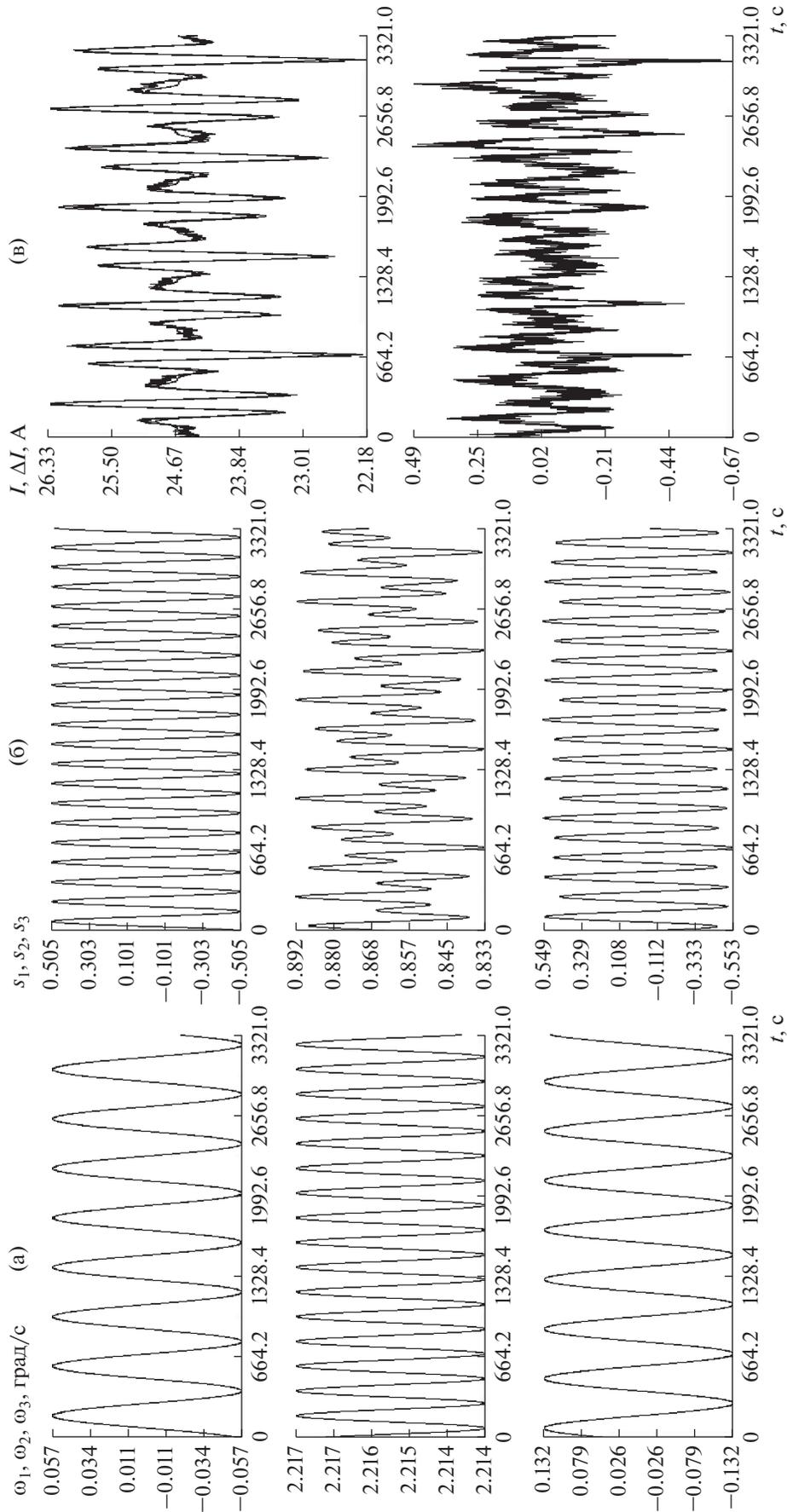
Точность построенных реконструкций движения корабля по описанной методике характеризуется стандартными отклонениями уточняемых параметров. Анализ этих стандартных отклонений вместе с анализом собственных векторов матрицы  $C$ , отвечающих ее нескольким минимальным собственным числам, позволяет понять характер неопределенности, которая возникает



**Рис. 6.** Результаты обработки скорректированных измерений тока на интервале 3; (а), (б) решение системы (1), (2), (в) аппроксимация измерений,  $\sigma = 0.19$  А. Оценки параметров модели:  $\mu = 0.186$ ,  $\mu' = 0.861$ ,  $I_0 = 27.0$  А,  $\gamma = -0.079$ .



**Рис. 7.** Коррекция и спектральный анализ измерений на интервале 4; (а) удаление низкочастотной составляющей ( $M = 9$ ), (б) спектры скорректированных измерений, (в) аппроксимация измерений суммой гармоник с частотами 0.00249, 0.00371, 0.00615, 0.00860 Гц амплитудами 0.012, 0.39, 0.86, 0.44 А, СКО = 0.12 А. Оценки параметров модели:  $\Omega = 2.21$  град/с,  $\mu = 0.178$ ,  $\mu' = 0.887$ .



**Рис. 8.** Результаты обработки скорректированных измерений тока на интервале 4; (а), (б) решение системы 4; (а), (б) решение системы (1), (2), (в) аппроксимация измерений,  $\sigma = 0.15$  А. Оценки параметров модели:  $\mu = 0.171$ ,  $\mu' = 0.927$ ,  $I_0 = 28.5$  А,  $\gamma = -0.061$ .

при реконструкции движения. Анализ основан на формуле

$$C^{-1} = \sum_{k=1}^9 v_k v_k^T, \quad v_k = \frac{u_k}{\sqrt{p_k}},$$

где  $p_k$  и  $u_k$  – собственные числа и ортонормированные собственные векторы матрицы  $C$ . Вектор  $v_k$  – также собственный вектор матрицы  $C$ , отвечающий ее собственному числу  $p_k$ , но не нормированный. Его норма изменена так, чтобы его компоненты (будем обозначать их  $v_{k,\omega_1}$ ,  $v_{k,\omega_2}$ ,  $v_{k,\mu}$  и т.п.) характеризовали вклад в стандартные отклонения уточняемых параметров. Например, для стандартного отклонения  $\sigma_\mu$  имеет место формула

$$\sigma_\mu^2 = \sigma^2 \sum_{k=1}^9 v_{k,\mu}^2,$$

и если  $|v_{1,\mu}| \gg |v_{k,\mu}|$  ( $k = 2, 3, \dots, 9$ ), то  $\sigma_\mu \approx \sigma |v_{1,\mu}|$ . Таким образом, наибольшие стандартные отклонения имеют те определяемые параметры, которым отвечают наибольшие по модулю компоненты векторов  $v_k$ . Назовем эти векторы векторами чувствительности.

В качестве примера такого анализа исследуем точность реконструкции движения на интервале 2. Собственные числа матрицы  $C$  имеют значения:

$$p_1 = 2.694, \quad p_2 = 3.880, \quad p_3 = 172.1, \quad p_4 = 4493, \\ 49567, \quad 527989, \quad 9.976e + 007, \\ 1.282 + 008, \quad 1.326e + 009.$$

Тот факт, что минимальное собственное число положительно, означает принципиальную возможность реконструкции движения описанным способом. Компоненты используемых ниже векторов упорядочены в соответствии с записью:  $\omega_{10}$ ,  $\omega_{20}$ ,  $\omega_{30}$ ,  $\mu$ ,  $\mu'$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ . Наиболее значимые векторы чувствительности в рассматриваемом примере

$$v_1 = (0, 0, 0, 0, 0.10, -0.01, 0.03, 0.50, -0.33)^T, \\ v_2 = (0, 0, 0, 0, 0.50, 0.01, 0, -0.08, 0.02)^T, \\ v_3 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.04, 0.06)^T, \\ v_4 = (0, 0, 0, 0, 0, 0.01, 0.01, 0, 0)^T.$$

Компоненты, обозначенные здесь нулями, и компоненты остальных векторов чувствительности не превосходят по абсолютной величине 0.004. Как видим, наименее точно определяются параметры  $\mu'$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  (ср. табл. 2).

Отметим, что минимальное собственное число матрицы  $C$  было значимо больше нуля во всех вариантах реконструкции движения ТГК.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструировано неуправляемое вращательное движение ТГК *Прогресс М-24М* и *М-25М* в режиме закрутки на Солнце. Реконструкция выполнена с помощью интегральной статистической методики по телеметрическим значениям тока, снимаемого с его солнечных батарей. Данные телеметрии, собранные на освещенном участке орбиты, обрабатывались совместно с помощью интегрирования уравнений вращательного движения ТГК. В результате обработки оценивались начальные условия движения корабля относительно направления Земля—Солнце и параметры используемых математических моделей. Проведено исследование, поясняющее возможность реконструкции на основании таких, на первый взгляд, малоинформативных данных.

Во-первых, с помощью спектрального анализа выделены гармонические составляющие в исходных данных, несущие информацию о движении ТГК и некоторых его параметрах. Предложена методика удаления из этих данных посторонней низкочастотной составляющей, обусловленной, по-видимому, отраженным от Земли солнечным светом.

Во-вторых, исследована обусловленность задачи метода наименьших квадратов, лежащей в основе используемой интегральной статистической методики. Показано, что в принципе задача является невырожденной, хотя для некоторых отрезков обрабатываемых данных ее обусловленность может быть плохой. В таких случаях реконструкция движения может оказаться не достаточно точной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путин Г.Ф., Глухов А.Ф., Бабушкин И.А. и др. Исследование микроускорений на борту *Международной космической станции* с помощью датчика конвекции // *Космич. исслед.* 2012. Т. 50. № 5. С. 373–379.
2. Путин Г.Ф., Глухов А.Ф., Бабушкин И.А. и др. Эксперименты с датчиком конвекции ДАКОН-М // *Космич. исслед.* 2017. Т. 55. № 4. С. 278–284.
3. Беляев М.Ю., Легостаев В.П., Матвеева Т.В. и др. Отработка методов проведения экспериментов в области микрогравитации в автономном полете грузового корабля *Прогресс М-20М* // *Космическая техника и технологии.* 2014. Т. 3. № 6. С. 19–32.
4. Беляев М.Ю. и др. Эксперименты с вращательным движением космических кораблей *Прогресс*. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 4.
5. Беляев М.Ю., Матвеева Т.В., Монахов М.И. и др. Режимы неуправляемого вращательного движения корабля *Прогресс М-29М* // *Космич. исслед.* 2018. Т. 56. № 1. С. 54–67.
6. Теребиж В.Ю. Анализ временных рядов в астрофизике. М.: Наука, 1992.
7. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ГРУППИРОВОК СВЯЗИ В КОНТЕКСТЕ ФОРМИРОВАНИЯ НОВЫХ СЕРВИСОВ НА РЫНКЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСЛУГ

© 2021 г. А. А. Харлан<sup>1</sup> \*, Ш. Н. Биктимиров<sup>1</sup>, А. Б. Иванов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

\*alexander.kharlan@skoltech.ru

Поступила в редакцию 13.11.2019 г.

После доработки 17.02.2020 г.

Принята к публикации 05.03.2020 г.

Рассматривается методика оценки рынка перспективных глобальных телекоммуникационных сетей, включающих космический сегмент в виде мегагруппировок связи с глобальным покрытием. Согласно полученным результатам, к 2022 г. потребление трафика мобильными устройствами 5G по всему миру будет составлять около 8.5 ЭБ/мес. Возможная стоимость затрат на развертывание мегагруппировки связи для обеспечения широкополосного доступа в интернет в любой точке Земли может колебаться в диапазоне от 5 до 50 млрд долл. в зависимости от требований к сервису. Доказана возможность интеграции современных и перспективных космических группировок связи в состав глобальной телекоммуникационной инфраструктуры нового поколения. Показано, что при развертывании группировки из 600 и более аппаратов, стоимостью около \$ 10 млрд возможно предоставление сервиса транзита трафика от базовых станций в отдаленных районах при обеспечении населения широкополосным интернетом в сетях 5G.

DOI: 10.31857/S0023420621020047

### ВВЕДЕНИЕ

Беспроводная связь пятого поколения (5G) нацелена на значительное расширение возможностей наземных беспроводных сетей. Внедрение технологий 5 поколения позволит поднять на качественно иной уровень телемедицину, беспилотный автотранспорт, реализовать концепцию “умных городов” (smart cities), “интернета вещей” (IoT), а также децентрализованную (P2P) связь на основе VR (IEEE 5G and Beyond Technology Roadmap White Paper, <https://5g.ieee.org/images/files/pdf/ieee-5g-roadmap-white-paper.pdf>).

В последнее время началось развитие глобальных телекоммуникационных спутниковых сетей нового поколения [2, 4]. По состоянию на 2019 г. соответствующие космические средства и технологии уже частично испытаны на орбите (Starlink Mission – SpaceX, <https://www.spacex.com/news/2019/05/24/starlink-mission>). И хотя эти сети не ориентированы на работу с существующими коммерческими телекоммуникационными сетями, а их абоненты должны для подключения использовать специальное оборудование, разработчики глобальных космических решений заявляют характеристики, сравнимые с развивающимися стандартами мобильных сетей 5G. На первый взгляд кажется, что использование “космическо-

го” решения заведомо не конкурентоспособно по сравнению с наземными сетями ввиду дороговизны космической инфраструктуры, однако при ближайшем рассмотрении видно, что космические решения свободны, в частности, от таких недостатков наземных сетей, как высокая стоимость прокладки оптических линий в труднодоступных районах и высокая задержка при транспортировке пакета через несколько наземных хабов. Некоторые исследования уже сейчас описывают возможные сценарии использования космического сегмента в глобальной 5G-архитектуре (см., например, [1]), (диапазон 1) и 20–60 ГГц (диапазон 2). Диапазон 2 предполагает использование миллиметровых волн [5], что приводит к снижению возможного размера сот, что, в свою очередь, соответствует тенденции повышения спектральной и энергетической эффективности сети. К тому же, такие антенны меньше размером – до нескольких сантиметров.

Сектор радиокommunikаций Международного союза электросвязи (ITU-R) приводит три основных сценария пользования 5G: сценарий eMBB (улучшенный широкополосный мобильный доступ) подразумевает использование 5G как логического продолжения 4GLTE с улучшенными характеристиками; URLLC (сверхнадежная связь

**Таблица 1.** Определения сценариев развития 5G. В данной табл. I – “пессимистичный сценарий”, II – “реалистичный”, III – “оптимистичный”

Сценарий	I	II	III
Non-standalone-5G удовлетворяет критериям сценария eMBB	–	+	+
Число операторов, запустивших 5G	к 2021	40	100
	к 2024	145	275
	к 2027	250	450
NB-IoT и eMTC интегрируются в 5G по сценарию mMTC	–	+	+
Китайские компании могут работать на западном рынке	–	–	+
Полномасштабный запуск standalone-5G в миллиметровом диапазоне	2027	2025	2023
Освобождение нелицензируемых частот 5ГГц под 5G	–	+/-	+
Трудности с получением частот по числу операторов связи	60%	35%	10%
Повсеместный доступ к 5G-устройствам	2025	2023	2021
Вытеснение стационарных кабельных подключений 5G-подключениями (fixedwireless)	–	15% к 2027	30% к 2027

снизкой задержкой) предполагает использование сети в ситуациях, когда необходим бесперебойный, устойчивый и надежный доступ с низкой задержкой; mMTC (многоточечная машинная связь) предполагает соединение большого числа маломощных дешевых устройств, распределенных по широкой зоне покрытия. Следует отметить, что вероятность реализации требований по сценариям URLLC и mMTC до 2021 г. невысока, отчасти потому, что планируемая в 5G-сетях “внутрисетевая” задержка составляет 1–4 мс, однако на 2019 г. в тестируемых сетях удалось достичь лишь значения 9–12 мс (“New Services & Applications With 5G Ultra-reliable Low Latency Communications” (PDF). 5G Americas).

Отметим, что рассматривать космический сегмент в сетях 5G можно лишь по сценарию eMBB. Низкая задержка недостижима ввиду значительно большего расстояния до спутника на орбите, а mMTC – ввиду высокой плотности устройств.

Цель данной работы – выяснить, какое место глобальные телекоммуникационные спутниковые сети могут занять на мировом рынке связи с учетом планов развертывания наземных сетей 5 поколения. Для этого проанализирован возможный рост спроса на интернет-трафик, связанный с развитием новых сервисов на базе сетей 5G, а также текущие значения цен на трафик для конечных потребителей и IP-транзит; сделана оценка затрат на развертывание космических группировок связи нового поколения; приведен анализ возможного сценария предоставления услуг связи при помощи спутниковой группировки и сделан вывод о возможности занятия космическими группировками части глобального рынка мобильной связи как при прямом обслуживании абонентов, так и при предоставлении услуг

транзита трафика от базовых станций (“backhaul”-канал).

#### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РОСТА СПРОСА НА ИНТЕРНЕТ-ТРАФИК

Предположения о росте спроса на трафик, количестве подключений и абонентов мобильных сетей, делаются исследователями на основании ряда допущений. В работе (LTE and 5G Market Statistics – Global Mobile Suppliers Association, report, 8 April 2019, <https://gsacom.com/paper/lte-5g-market-statistics-8-april-2019/?utm=reports4g>) прогноз опирается, в частности, на количество операторов, заявивших о намерении перейти на 5G. Кроме того, прогнозные предположения могут основываться на политической и экономической ситуации в мире, результатах тестирования оборудования и других факторах.

В табл. 2 описываются параметры сценариев со слабым (I), реалистичным (II) и бурным (III) ростом спроса на трафик. За основу для прогнозирования спроса используются данные компании Ericsson (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>), примерно соответствующими “реалистичному” сценарию развития мобильных сетей. Для формирования “реалистичного” прогноза числа абонентов 5G используем данные (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>) и экстраполируем их до 2027 г. с учетом данных о количестве подключенных операторов, приведенных в (LTE and 5G Market Statistics – Global Mobile Suppliers Association, report, 8 April 2019, <https://gsacom.com/paper/lte-5g-market-statistics-8-april-2019/?utm=reports4g>)

и воспользуемся данными о распределении подключений из (IoT connections outlook – Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/november-2018/iot-connections-outlook>). При этом из IoT-устройств будем учитывать только подключенные к сетям мобильных операторов. Количество таких устройств, по данным Ericsson, достигнет 1.5 млрд к 2022 г., и его рост не будет столь бурным, как рост общего числа IoT-устройств. Эти оценки хорошо коррелируют с оценками компании Cisco (Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, whitepaper <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf>), согласно которым количество 5G-подключений к 2022 г. достигнет 430 млн (3% всех подключений), причем каждое из них будет в среднем потреблять 22 Гб данных в месяц, что составит до 12% от всего мобильного трафика в мире.

При этом количество пользовательских мобильных подключений (всех поколений) после 2022 г. не будет расти так же быстро, как в 2015–2019 гг. (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>) – (Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, whitepaper <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf>) ввиду насыщения азиатского и африканского рынков и достижения естественного потолка проникновения мобильной связи. Количество же сотовых IoT-устройств, напротив, будет расти все более высокими темпами. Этот фактор приведет к небольшому замедлению роста трафика, потребляемого в единицу времени средним абонентом 5G-сетей.

Зависимость общемирового потребления трафика от времени получена путем экстраполяции данных (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>) – (Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, whitepaper <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf>) с использованием в качестве опорных точек статистических данных за 2017–2019 гг. и введения поправок на допущения о возможных сценариях, описанных в табл. 2 (рис. 1).

Значения потребления для сценария II (умеренный рост потребления) примерно совпадают с данными Ericsson и Cisco (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>) – (Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, whitepaper <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf>).

**Таблица 2.** Параметры для оценки бюджета радиосвязи. Предполагается канал с аддитивным белым Гауссовым шумом

Параметр	Значение
Коэффициент усиления антенны КА	50 дБ
Коэффициент усиления антенны наземной станции	45 дБ
Частота	12 ГГц
Потери на прохождение тропосферы	0.07 дБ/км
Требуемое соотношение Eb/N0	25 дБ
Шумовая температура	500 К
Коэффициент помехоустойчивого кодирования	0.5
Суммарные потери в трактах	4 дБ

lateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf). Так, согласно этим данным, к 2022 г. потребление трафика 5G устройствами по всему миру будет составлять около 8.5 ЭБ/мес, что подтверждается результатами расчета.

Подробную оценку потребления проведем по модели, описанной в [10]. Модель генерирует абонентскую активность в любой зоне, при этом учитываются следующие факторы: географическое положение; тип местности: городской, пригородный, сельский, отдаленный; время суток.

Для моделирования населения используются данные NASA (SEDAC) (Gridded Population of the World (GPW) – NASASEDAC <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4>). Для работы алгоритма используется база данных городов Geo names.org (Geo names – open data base <http://www.geonames.org>). Данные по интенсивности потребления берутся из статистических источников (Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>) – (Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, whitepaper <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf>, а также отчетов статистических агентств (Daily mobile internet usage per capita world wide 2011–2021 – Statista <https://www.statista.com/statistics/433877/daily-mobile-internet-usage-worldwide/>), (Digital, Social & Mobile World wide In 2015 – Wearesocial <https://wearesocial.com/uk/special-reports/digital-social-mobile-worldwide-2015>). Ненадежность этих данных может приводить к небольшим локальным искажениям результатов моделирования, однако все коэффициенты нормированы с учетом среднемировых показателей потребления, и потому не будут влиять на результаты моделирования в общемировом масштабе. Достоверность используемых

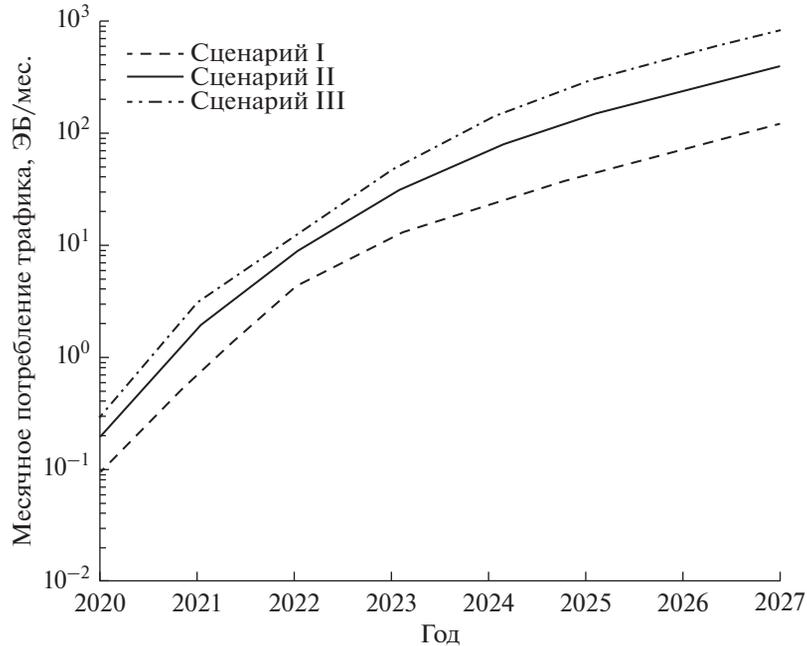


Рис. 1. Ежемесячное потребление трафика при разных сценариях развития рынка мобильной связи.

в настоящем исследовании статистических данных предлагается принять в качестве допущения.

Трафик, потребляемый на некоторой площади  $S$  за время  $\Delta t = (t_1; t_2)$ , можно вычислить, как

$$T_s = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \cdot \iint_S N(\varphi, \lambda) \cdot U(\varphi, \lambda) \cdot P(\varphi, \lambda) d\varphi d\lambda, \quad (1)$$

где  $N(\varphi, \lambda)$  – население ячейки с географическими координатами (широта, долгота)  $\varphi, \lambda$ ;  $U(\varphi, \lambda)$  – поправка на интенсивность потребления в ячейке по типу местности и стране;  $P(\varphi, \lambda)$  – коэффициент проникновения (число устройств на душу населения);  $p(t)$  – суточный профиль потребления (усредненное потребление с учетом неравномерности по времени суток, байт/с).

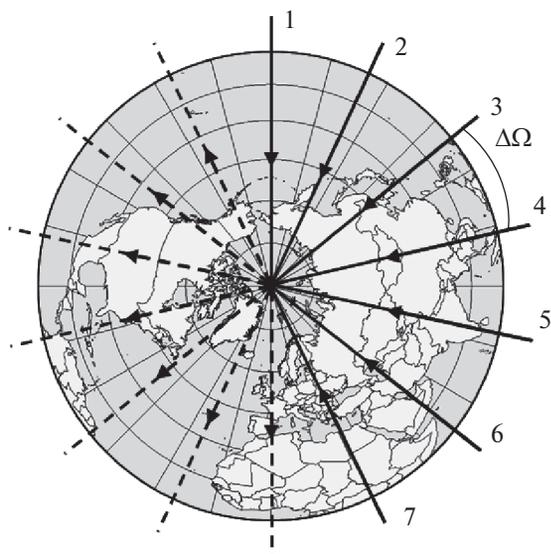
Далее, будем применять зависимость вида (1) для подсчета трафика в произвольной зоне путем сложения значений, вычисленных в ячейках малого размера, полученных по данным (Gridded Population of the World (GPW) – NASA SEDAC <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4>).

Согласно прогнозам, к 2021 г. сети 5G будут развернуты в ограниченном количестве городов, а общая доля подключений 5G среди всех мобильных абонентов в мире будет составлять не более 1%. Тогда оценка пикового трафика в зоне обслуживания гипотетического низкоорбитального спутника может быть сведена к оценке трафика, генерируемого пользователями тестовых сетей в таких городах. Так, например, общее чис-

ло абонентов 5G агломерации Шанхая составляет в 2021 г. около 2.2 млн, то есть примерно 7% всего населения зоны. Это примерно соответствует ситуации, когда небольшая доля представленных на рынке операторов перешла на 5G, при этом большинство (более 85%) пользователей этих сетей еще не обзавелись устройствами, поддерживающими новые стандарты.

Общее значение трафика, генерируемого абонентами в данной зоне, может быть посчитано с учетом известного значения средней пропускной способности канала. Так, для скорости 512 Мбит/с, в зоне, изображенной на рис. 3, в секунду генерируется около 217 Гбит трафика. Это максимальное значение, соответствующее вечернему пику абонентской активности. При таком сценарии в среднем в мире всеми 5G-абонентами генерируется в секунду до 1.5 Тбит трафика. В дальнейшем значения трафика, получаемые таким образом, будут использоваться в качестве исходных данных для расчета пропускной способности спутниковых сетей.

К 2027 г. большинство абонентов сетей, поддерживающих 5G, уже будут обладать соответствующими устройствами, количество сетей возрастет, сервисом будут обеспечены небольшие города, а число 5G IoT-устройств будет превышать число пользовательских устройств более, чем в 1.5 раза. Тогда, если вновь говорить о крупных городах, то к 2027 г. спрос на 5G-трафик в агломерациях мегаполисов может возрасти в 100–200 раз (если за исходное значение общемирового потребления взять прогнозное значение с графика на рис. 1).



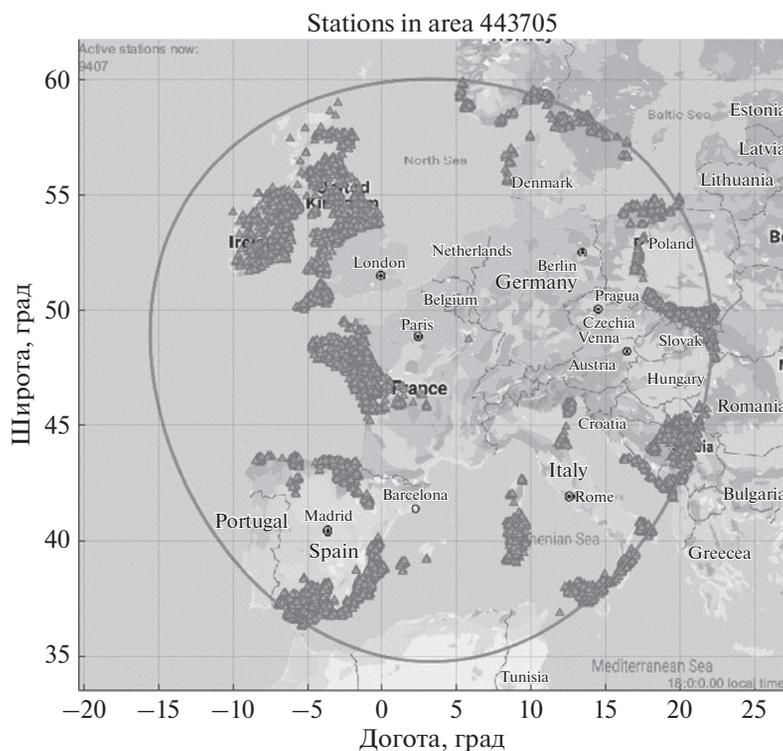
**Рис. 2.** Расположение орбитальных плоскостей для спутниковой группировки полного непрерывного покрытия поверхности Земли.

В контексте задач настоящего исследования имеет смысл также оценить объем трафика, проходящий на зону обслуживания одного гипотетического спутника связи. И хотя орбиты таких спутников еще не были определены, для оценки порядка величин можно использовать размер зоны обслуживания из работы [10], т.е. считать зону

обслуживания кругом радиусом 750 км (значение радиуса варьируется в зависимости от высоты орбиты КА и параметров его антенной системы).

### ОЦЕНКА ЗАТРАТ НА КОСМИЧЕСКУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ

Стоимость интернет-трафика для абонентов по мере развития технологий в пределах одного поколения мобильных сетей меняется довольно слабо. Цены в разных странах очень сильно отличаются друг от друга (от \$0.26 за 1 Гб в Индии до \$20.22 в Швейцарии (IP Transit Forecast Service – Tele Geography <https://www2.telegeography.com/ip-transit-forecast-service>), однако, согласно данным источников (The Cost Of Mobile Internet Around The World [Infographic] – Forbes/Statista <https://www.forbes.com/sites/niallmccarthy/2019/03/05/the-cost-of-mobile-internet-around-the-world-in-fographic/#32ad5a87226e>) – (Out look for IP Transit Prices in 2018 – Tele Geography <https://blog.telegeography.com/outlook-for-ip-transit-prices-in-2018>) цены на трафик в разных странах будут выравниваться при общем повсеместном снижении цены на фоне конкурентной борьбы операторов связи на рынке 5G. Вместе с тем, на развитие инфраструктуры тратятся значительные средства: согласно опубликованным данным ITU (ITU’s flagship IC Tregulatoryreport – ITU [http://www.itu.int/net/pressoffice/press\\_releases/2016/12.aspx#.XW\\_cGEVR2Un](http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2016/12.aspx#.XW_cGEVR2Un)), порядка \$ 30 млрд ежегодно вкла-



**Рис. 3.** Активные базовые станции при общем числе станций более 440 тыс.

дывается в развитие оптических сетей по всему миру. При этом общая цена развертывания 5G-инфраструктуры может достигать \$ 1 млн за 1 кв. км [3]. Эти данные позволяют говорить о наличии возможности финансирования спутниковых проектов при переходе от оптических к спутниковым backhaul-каналам.

Оценку бизнес-моделей и долей рынка для разных вариантов спутниковых сервисов, интегрированных в сети 5G, можно провести, имея представление о стоимости космической инфраструктуры. При любом сценарии абонентского обслуживания, для использования в составе космического сегмента необходимо сложное энергоемкое антенное оборудование, значительно повышающее стоимость орбитальной группировки. Проведем ниже оценку этой стоимости на основании уже существующего и частично реализованного проекта спутниковой сети для оказания услуг связи, сравнимых, с точки зрения конечного потребителя, с 5G-связью.

В основе методики оценки лежит принцип “reverse engineering”, предполагающий анализ существующих данных о разрабатываемых изделиях и выработку гипотез о полном облике системы для оценки тех или иных ее параметров.

Несколько лет назад компания SpaceX заявила о создании группировки из 12 тыс. спутников для обеспечения всей Земли широкополосным интернетом. В рамках настоящего исследования для основы оценки была выбрана именно эта сеть, поскольку многие ее параметры известны, пропускная способность сети примерно соответствует требованиям 5G, а также заявлена ориентировочная цена проекта.

Подробное описание исследования, в ходе которого была произведена данная оценка, приведено в [9]. Требования к гипотетической сети взяты из отчетов компании SpaceX и заявлений ее представителей (Elon Musk just revealed new details about Starlink – Business Insider <https://www.businessinsider.com/spacex-starlink-satellite-internet-how-it-works-2019-5>), а также частотной заявки, поданной компанией SpaceX в надзорный орган США по вопросам радиочастот (SpaceX Non-Geostationary Satellite System – FCC Application, SpaceX). Эта информация касается состава и построения группировки, порядка обслуживания абонентов и базовых характеристик аппарата.

В ходе исследования применялся принцип модельно-ориентированного системного проектирования (MBSE). В результате была разработана комплексная модель системы, содержащая множество параметров ее основных частей.

Космический сегмент группировки включает 4425 спутников, работающих в диапазонах Ka/Ku, и 7518 спутников, использующих V-диапазон.

Для оценки энергетических возможностей отдельного спутника требуется знать, какое количество трафика пользователь потребляет, имея широкополосное Интернет-соединение. В работе [9] были проанализированы сценарии потребления от 30 до 80 ГБ в месяц. При расчете применяется методика оценки стоимости системы используемая Европейским космическим агентством для оценки проектов на ранней стадии [6, 7].

По результатам исследования была составлена смета по системам аппарата с оценкой погрешности. Стоимость первого экземпляра модельного космического аппарата, соответствующего по основным параметрам и составу систем аппарату группировки SpaceX, составила порядка \$ 45.9 млн, а средняя погрешность – около 30% [9].

При большом количестве спутников в составе орбитальной группировки стоимость одного аппарата может быть значительно уменьшена при массовом производстве. Основное уравнение для оценки стоимости при массовом производстве:

$$C = T_1 \cdot N^{1 + \frac{\ln S}{\ln 2}}, \quad (2)$$

где  $C$  – общая стоимость,  $T_1$  – стоимость первого экземпляра,  $N$  – число экземпляров,  $S$  – параметр кривой обучения.

При значении параметра кривой обучения, равном 85% (по рекомендациям из [7]), можно оценить общую стоимость группировки. Она составляет, согласно расчетам, около \$ 60.8 млрд, а средняя цена за спутник при массовом производстве – \$ 5.1 млн.

Таким образом, общая цена проекта превысила 60 млрд долларов, что намного больше озвученной разработчиком оценки в 10 млрд. При этом отследить структуру заявленной стоимости в \$ 10 млрд не представляется возможным: эта цифра была приведена главой компании Илоном Маском в соцсетях и не подкреплена никакими официальными документами. Вероятно, такая оценка не учитывает некоторых значимых факторов, таких как затраты на изначальную проработку проекта или запуски аппаратов, поскольку даже полученная оценка в \$ 60 млрд является в целом оптимистичной в силу причин, обозначенных в [9].

При анализе возможности применения космического сегмента в системах мобильной связи нового поколения будем пользоваться аналогичной методикой.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АРХИТЕКТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА

Основным отличием спутников связи нового поколения от спутников связи старого образца будет повышенная энерговооруженность. Это требование вытекает из необходимости обслужи-

вать одновременно несколько тысяч абонентов с помощью мощной антенной решетки, а также передавать трафик по межспутниковому каналу. Так, в работах [9, 10] говорится о спутниках с мощностью, потребляемой полезной нагрузкой, до 4 кВт.

Сами же высоты орбит получаются исходя из выбора частотных диапазонов. Чем выше частота сигнала, тем сильнее он затухает с расстоянием, и поэтому такие спутники требуется размещать как можно ближе к абонентам, иначе их мощности просто не хватит для обслуживания требуемого числа абонентов.

Для оценки экономических моделей группировки связи рассматриваются конфигурации, обеспечивающие полное непрерывное покрытие Земли. Это возможно, например, при выполнении следующих условий: спутники расположены на круговых околополярных орбитах; большие полуоси и наклонения орбит одинаковы для всех спутников; группировка состоит из  $P$  орбитальных плоскостей, в каждой из которых  $S$  спутников равномерно распределены по орбите.

Для построения группировки с полным покрытием рассматривается метод, предложенный в [6], который используется для построения низкоорбитальных группировок связи SpaceX (Starlink Mission – SpaceX <https://www.spacex.com/news/2019/05/24/starlink-mission>) и Iridium [8]. Согласно [6] конфигурация группировки может быть задана тремя параметрами  $T/P/F$ , где  $T$  – общее количество спутников,  $P$  – число орбитальных плоскостей (рис. ),  $F$  – целочисленный параметр, смысл которого поясняется ниже. Рассмотрим, например, одну из конфигураций группировки, в которой каждый спутник движется по круговой орбите высотой 1200 км и наклонением  $90^\circ$ . Каждый спутник оборудован антенным устройством с диаграммой направленности в виде конуса с углом раствора  $100^\circ$ . Антенны всех спутников направлены в надир. Всего группировка насчитывает 112 аппаратов ( $T = 112$ ), расположенных в семи орбитальных плоскостях ( $P = 7$ ), как изображено на рис. 2. Плоскости распределены равномерно по долготе восходящего узла. Угловые расстояния между соседними плоскостями определяются как  $\Delta\Omega = \pi/P$ . Каждая плоскость насчитывает  $S = T/P$  космических аппаратов равномерно распределенных по орбите с шагом в  $\Delta\nu = 2\pi/S$ . При этом, во избежание столкновений между аппаратами разных плоскостей вблизи полюсов предусматривается сдвиг по истинной аномалии между спутниками на соседних орбитах, который в свою очередь определяется как  $\Delta f = 2\pi F/T$ . Таким образом, параметр  $F$ , который в данной конфигурации принимается равным двум отвечает за разницу во времени про-

хождения восходящего узла (или полюса) спутниками, находящимися в соседних плоскостях.

## МОДЕЛИ СПУТНИКОВЫХ СЕРВИСОВ ДЛЯ 5G

Исходя из данных предыдущих разделов, существует принципиальная возможность применять спутники для дополнения сетей 5G по следующим основным сценариям:

1) Обслуживание индивидуальных абонентов по сценарию eMBB в районах, где развертывание и эксплуатация полноценной базовой сети и станций обслуживания инфраструктуры не будут рентабельными: это районы с низкой плотностью населения и отдаленные от больших городов и 5G-хабов.

2) Backhaul-канал между базовыми станциями и основной сетью. Этот сценарий гипотетически может быть введен в районах со средней плотностью населения, где развертывание оптических backhaul-каналов становится менее рентабельным.

3) IP-транзит. Услуги спутниковых провайдеров IP-транзита могут оказаться востребованными на этапе, когда пропускной способности существующих каналов будет не хватать для предоставления услуг.

4) Пиринговые услуги, т.е. передача трафика между конкретными провайдерами на равноправной основе, без взимания ими платы друг с друга. Этот сценарий может стать реальностью в регионах, где провайдеры не очень активно переходят на пиринговые соглашения ввиду необходимости введения физического соединения своих сетей в обход IP-транзитных операторов.

Для случая индивидуального обслуживания задача моделирования предоставления услуг сводится к аналогичной той, что была проделана при оценке стоимости инфраструктуры, однако пропускная способность отдельно взятого спутника окажется намного ниже ввиду того, что обслуживать в данном случае нужно обычные мобильные устройства с ненаправленными антенными системами, а не специальные терминалы. Следует учесть, что в зонах, где есть доступ к оптической инфраструктуре сетей предыдущих поколений, возможно развертывание LTE или 5G, и спутниковый канал спросом пользоваться не будет.

Согласно результатам моделирования по методике, описанной в [10], число абонентов в пике для одного спутника может составлять 200–2000 ед. (широкополосный канал), а также дополнительно до 20 тыс. голосовых соединений. Всего же в мире абонентов данной категории к 2027 г. может быть до 50 миллионов. Кроме того, в эту же категорию могут попасть до 100 млн IoT-устройств, используемых на удаленных объектах и в труднодоступных районах.

**Таблица 3.** Число станций, одновременно обслуживаемых единичным спутником в зависимости от высоты орбиты, скорости подключения для конечного пользователя, а также половинного угла конуса, в котором распространяется сигнал от антенной системы КА (полуширина луча по половинной мощности)

Сектор, град	Скорость	Высота, км				
		600	750	900	1050	1200
40°	1 Гбит/с	1491	681	472	355	262
	2 Гбит/с	735	343	238	179	126
45°	1 Гбит/с	885	553	404	254	176
	2 Гбит/с	436	276	200	125	89
50°	1 Гбит/с	639	448	232	179	126
	2 Гбит/с	318	221	119	90	61

Согласно расчетам, при цене трафика до \$1 за 1 ГБ (IP Transit Forecast Service – Tele Geography <https://www2.telegeography.com/ip-transit-forecast-service>) такие абоненты будут генерировать доход до \$80 млрд в год мобильным операторам, а общее потребление трафика будет составлять до 21 Тбит/с.

Обеспечить обслуживание такого числа абонентов без специальных абонентских устройств проблематично: даже для сети образца Starlink (SpaceX Non-Geostationary Satellite System – FCC Application, SpaceX) с ее абонентскими устройствами, обеспечивающими на уровне абонента значительное усиление сигнала, потребуется полная загрузка более чем 1200 аппаратов. Если же обслуживать требуется обычные мобильные устройства, то даже при уменьшении требований к пропускной способности потребное число аппаратов будет исчисляться десятками тысяч. Поэтому для спутникового проекта, реализующего такой сценарий, нет жизнеспособной бизнес-модели.

Модель backhaul-сервиса, с другой стороны, заслуживает детального рассмотрения. Она предполагает развертывание в районах с невысокой плотностью населения и без существующей наземной инфраструктуры сети базовых станций, которые будут обеспечивать подключение к 5G по сценарию eMBB, однако для соединения с базовой сетью будут вместо оптического наземного использовать спутниковый канал.

Для моделирования такого сценария рассмотрим всех возможных абонентов, удовлетворяющих следующим критериям:

- Плотность населения от 100 до 800 чел./кв. км. В таких регионах капитальные затраты на сетевую инфраструктуру в пересчете на одного абонента примерно в 10 раз выше, чем в крупных городах [3];

- Отдаленность от крупных 5G или LTE-хабов, к которым нужно будет тянуть оптические линии в случае наземного backhaul-канала.

Согласно подсчетам (методика описана в разделе выше), этим критериям в Европе и США удовлетворяет около 5% населения. Для центральной и западной Европы, например, согласно прогнозу 2027 г. это примерно 25 млн абонентов и 42 млн IoT-устройств. Эти абоненты генерируют в пиковое время суток около 13.5 Тбит трафика в секунду.

Чтобы вычислить необходимое количество базовых станций, определим площади ячеек, содержащих абонентов, удовлетворяющих приведенным выше критериям, и присвоим каждой ячейке некоторое количество базовых станций, так, чтобы эти станции, зоны обслуживания которых являются кругами с радиусом 300 м, покрывали всю площадь ячейки. Так, если, например, некоторые из операторов в Европе подключат всех своих абонентов в описанных зонах к 5G, то для ситуации, изображенной на рис. 3, потребуются более 440 тыс. наземных станций на общей площади около 125000 кв. км.

Допустим, что часть из этих станций оснащена антенной системой для работы со спутниковой сетью, предоставляющей backhaul-канал. Частоты для такой системы могут не совпадать с частотами, выделенными под 5G. Для примера рассмотрим систему, работающую в Ku-диапазоне на частотах около 12 ГГц. Пусть базовые станции позволяют в среднем выделять абонентам канал со скоростью до 1 (2) Гбит/с. Тогда, просчитав бюджет радиолинии, можно вычислить, сколько наземных станций может быть обслужено одним спутником такой сети одновременно, если параметры аппаратов будут такими же, как в [9]. Основные параметры для расчета бюджета радиолинии приведены в табл. 2. Результаты расчетов приведены в табл. 3 в зависимости от высоты аппарата, сектора сканирования его антенной системы, а также скорости для конечного потребителя.

Видно, что при увеличении высоты орбиты возможности спутника уменьшаются в силу потерь на распространение радиосигнала. Увеличение сектора сканирования также влияет на общую емкость негативно, поскольку расход мощности на обслуживание абонентов на краю зоны становится ощутимее. Однако оба этих фактора позволяют снизить число аппаратов в группировке, что может позволить запустить сервис при меньших инвестиционных вложениях в инфраструктуру.

Величина сектора сканирования и высота орбиты позволяют судить о приблизительном количестве аппаратов в группировке. Модель орбитального построения, использованная для этой

**Таблица 4.** Количество базовых станций, которые может обслужить спутниковый сервис различной конфигурации, количество средств, высвобождаемых при замене станций в таком количестве, подключенных по оптической линии, на спутниковые станции, для разных случаев, количество спутников, необходимых для такого сервиса, и общая стоимость группировки. В таблице выделены конфигурации, для которых создание группировки окупается

Конфигурация	1 Гбит/с		2 Гбит/с		Число КА	Стоимость группировки, \$ млрд
	число станций	доступные средства, \$ млрд	число станций	доступные средства, \$ млрд		
600 км – 40°	7000	41.6	6088	36.2	1375	12.6
600 км – 45°	4533	26.9	2233	13.3	900	9.1
600 км – 50°	2423	14.4	1206	7.2	612	6.8
750 км – 40°	3225	19.1	1624	9.6	840	8.7
750 км – 45°	1993	11.8	995	5.9	560	6.3
750 км – 50°	1385	8.2	683	4.1	364	4.6
900 км – 40°	1742	10.3	879	5.2	576	6.5
900 км – 45°	1275	7.6	631	3.7	377	4.7
900 км – 50°	488	2.9	250	1.5	240	3.3
1050 км – 40°	1105	6.6	557	3.3	392	4.8
1050 км – 45°	587	3.5	289	1.7	264	3.6
1050 км – 50°	311	1.8	156	0.9	168	2.5
1200 км – 40°	676	4	325	1.9	288	3.8
1200 км – 45°	306	1.8	155	0.9	189	2.8
1200 км – 50°	163	1	79	0.5	112	1.9

оценки, приведена выше, а полученное количество аппаратов – в табл. 4.

Следует отметить, что общее число обслуженных таким образом базовых станций может составлять от 1.5% общей потребности выделенного в данном анализе класса абонентов, в случае высоких орбит и широких секторов сканирования, до почти 100% при низких орбитах и узких секторах сканирования.

При этом, ввиду особенностей орбитального построения космических систем, более высокие широты будут часть времени или все время неизбежно покрыты более, чем одним спутником. С учетом этого фактора, подсчитаем общую долю станций, которые можно обслужить, среди всех гипотетических станций в мире, которые соответствовали бы всем абонентам рассматриваемого класса (это число по приблизительным подсчетам составляет 7 млн штук). Общее число станций в мире, которые могут пользоваться таким сервисом, в зависимости от параметров группировки и обеспечиваемой скорости для конечного потребителя, приведено в табл. 4.

Для оценки стоимости наземной станции будем использовать данные, приведенные в [3]. Пусть объем средств, высвобождаемый компанией-владельцем базовых станций при установке спутниковых терминалов за счет отсутствия необходимости в оптической сети, составляет 30% от общей стоимости инфраструктуры, что при-

близительно соответствует данным из [3] для типов местности, для которых проводится расчет в настоящей работе. Стоимость группировки рассчитаем для каждого случая по модели, описанной выше. Результаты приведены в табл. 4.

Видно, что при размещении достаточно большого числа спутников на невысоких орбитах переход к спутниковому обслуживанию действительно может быть более экономически эффективен для мобильных операторов или владельцев сетевой инфраструктуры. При этом, если охватить больше абонентов, предоставляя скорость до 1 Гбит/с каждому из них, можно также получить ощутимую прибыль.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В то время, как новые требования по пропускной способности и энергоемкости сетей приводят к необходимости развертывания базовых станций 5G на расстоянии в сотни метров друг от друга для обеспечения требуемого качества связи, спутники с расстояния в сотни километров вряд ли смогут заменить базовые станции и обслуживать абонентов напрямую. Однако показано, что при некоторых условиях спутники могут стать жизнеспособным решением – в ситуациях, когда нужно обслужить отдаленные от больших городов районы с небольшой плотностью населения, стоимость прокладки оптического backhaul-канала может оказаться

слишком высокой, что открывает возможности для альтернативных решений.

Основной выявленной особенностью можно считать то, что такая модель возможна лишь при обслуживании большого числа абонентов по этому принципу: с одной стороны, нельзя развернуть только часть группировки и начать обслуживание, поскольку мобильный интернет, работающий, например, 50% времени в сутки, не будет пользоваться спросом; с другой стороны, развертывание более дешевой группировки для обслуживания небольшой доли рынка не принесет операторам ощутимой прибыли, и, в случае высокой стоимости подключения рассматриваемых регионов к 5G-сетям, операторы скорее откажутся от этого сегмента рынка, чем прибегнут к неэффективным спутниковым сервисам. Таким образом, спутниковые группировки могут занять нишу на рынке обслуживания описанного в данной работе класса абонентов, и при этом даже стать основным каналом для такого обслуживания, однако стоимость входа на данный рынок будет для оператора спутниковой сети очень высокой — миллиарды долларов прямых инвестиций в инфраструктуру на самом начальном этапе проекта.

Модель развития такого проекта будет предполагать быстрое внедрение 5G в зонах обслуживания большинства мобильных операторов и развертывание спутникового сервиса с большой пропускной способностью. Решению такой задачи будет способствовать ситуация, при которой оператор спутниковой сети будет также являться разработчиком базовых станций, чтобы иметь возможность предлагать мобильным операторам уже готовое решение, а не интегрировать инфраструктуру для спутникового сервиса в наземные сети каждого отдельно взятого оператора. В этом случае пройти путь повсеместного развертывания сети можно значительно быстрее. При этом капитальные затраты на инфраструктуру для такого гипотетического спутникового оператора могут

возрасти еще сильнее. С другой стороны, космические проекты с требуемыми инвестициями в десятки миллиардов долларов уже сегодня становятся реальностью (“New Services & Applications With 5G Ultra-reliable Low Latency Communications” (PDF). 5G Americas).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Giambene G. et al.* Satellite-5G Integration: A Network Perspective // IEEE Network. 2018. V. 32. P. 25–31.
2. *Yongtao Su et al.* Broadband LEO Satellite Communications: Architectures and Key Technologies // IEEE Wireless Communications. 2019. V. 26. № 2.
3. *Oughton J., Frias Z., Gaast S. et al.* Assessing the capacity, coverage and cost of 5G infrastructure strategies: Analysis of the Netherlands // Telematics and Informatics. 2019. V. 37. P. 50–69.
4. *Portillo I., Cameron B., Crawley E.* A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband // Acta Astronautica. 2019. V. 159. P. 123–135.
5. *Rappaport T., Sun S., Mayzus R. et al.* Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! // IEEE Access. 2013. № 1. P. 335–349.
6. *Wertz J.* Space mission engineering: The New SMAD. Springer Microcosm Press, 2010.
7. *Fox B.* Guidelines and Metrics for Assessing Space System Cost Estimates. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2008.
8. *Fossa Carl et al.* An overview of the IRIDIUM (R) low Earth orbit (LEO) satellite system // Proceedings of the IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference. NAECON, 1998.
9. *Kharlan A., Veliev N., Biktimirov S. et al.* A University-Based Facility for Evaluation and Assessment of Space Projects // Proceedings of the 69th International Astronautical Congress (IAC), October 2018, Bremen, Germany.
10. *Kharlan A., Teplyakov V.* Software Development for Global Telecom Satellite Network Complex Simulations // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, October 2016, Guadalajara, Mexico.