

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ И  
МАТЕМАТИКИ им. А.Н.Тихонова  
Национальный исследовательский университет  
Высшая школа экономики

**Зотов Леонид Валентинович**

**ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ  
И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

монография

Москва–2022

УДК 521-93  
ББК 22.61  
PACS 91.10.Nj

© Зотов Леонид Валентинович

**Вращение Земли и климатические процессы.** – М:  
НИУ ВШЭ, 2022. – 306 с.

Работа посвящена рассмотрению геофизических процессов, вызывающих движение полюса и изменение длительности суток. Особое внимание уделено чандлеровскому движению полюса. Разработана методика его выделения и восстановления геодезического возбуждения. Исследуются атмосферные и океанические возбуждающие функции в чандлеровском диапазоне. С использованием данных по гравитационному полю Земли со спутников GRACE анализируются первые коэффициенты разложения гравитационного потенциала в аспекте влияния соответствующего перераспределения масс на вращение Земли. Дана классическая теория вращения Земли с жидким внешним и твердым внутренним ядром, на её основе уравнения Эйлера-Лиувилля обобщены на случай трехосной Земли с океанами. В работе также проводится статистический анализ прогнозов параметров вращения Земли, обсуждаются взаимосвязи вращения Земли и климатических процессов.

ISBN: 978-5-600-03155-5

Научные консультанты: Астроном Парижской обсерватории  
Кристиан Бизуар,  
д.ф.-м.н. Н.С. Сидоренков

# Содержание

Предисловие	6
Введение	9
<b>1 Параметры вращения Земли</b>	<b>13</b>
1.1 Методы наблюдений за вращением Земли . . . . .	13
1.2 Центр параметров вращения Земли МСВЗ . . . . .	17
1.3 Параметры ориентации Земли . . . . .	20
<b>2 Аспекты теории вращения Земли</b>	<b>26</b>
2.1 Кинематические соотношения в подвижной и неподвижной системах координат . . . . .	26
2.1.1 Координаты и скорости . . . . .	26
2.1.2 Ускорения . . . . .	28
2.1.3 Центробежное и кориолисово ускорения . . . . .	29
2.2 Уравнение Лагранжа вращения твердого тела . . . . .	30
2.3 Динамические уравнения Эйлера . . . . .	31
2.4 Уравнения Эйлера-Лиувилля . . . . .	33
2.5 Чандлеровское колебание полюса . . . . .	37
2.6 Уравнения Эйлера-Лиувилля в матричном виде . . . . .	40
2.7 Учет влияния ядра, комментарии об обозначениях . . . . .	41
2.8 Вывод уравнения для момента импульса жидкого ядра . . . . .	43
2.9 Вывод уравнений вращения трехслойной Земли . . . . .	47
2.9.1 Вывод уравнений для твердого ядра . . . . .	48
2.9.2 Вывод уравнений для жидкого ядра . . . . .	50
2.9.3 Вывод уравнений для всей Земли с мантией . . . . .	52
2.9.4 Система уравнений для колебания осей мантии, внешнего и внутреннего ядер . . . . .	54
<b>3 Обобщенное уравнение Эйлера-Лиувилля</b>	<b>59</b>
3.1 Экскурс в проблему . . . . .	59

3.2	Трехосная асимметрия . . . . .	62
3.3	Асимметрия полюсного прилива . . . . .	66
3.3.1	Эффект вращательной деформации . . . . .	66
3.3.2	Обобщенные экваториальные уравнения Лиувилля в линеаризованном виде . . . . .	67
3.4	Решение обобщенных линеаризованных уравнений Лиувилля	69
3.4.1	Решение в частотной области и собственные частоты	69
3.4.2	Решение во временной области . . . . .	72
3.4.3	Влияние на вынужденную нутацию на частоте $\sigma_0$ .	72
3.5	Наблюдательные следствия . . . . .	73
3.5.1	Симметрический и асимметрический отклик на круговое возбуждение на заданной частоте . . . . .	73
3.5.2	Собственная эллиптичность . . . . .	75
3.5.3	Численные оценки величин асимметрического вкла- да во временной области. . . . .	76
3.5.4	Следствия для геодезического возбуждения . . . . .	77
3.6	Выводы и замечания . . . . .	78
<b>4</b>	<b>Методика решения обратной задачи восстановления входного чандлеровского возбуждения</b>	<b>81</b>
4.1	Решение обратной задачи восстановления чандлеровского возбуждения . . . . .	81
4.2	О погрешности выделения чандлеровской компоненты . .	87
4.3	Изменения ЧДП без фильтрации . . . . .	89
4.4	Использованные данные по эффективному угловому мо- менту . . . . .	91
4.5	Сравнение геодезического и геофизического возбуждений в чандлеровском диапазоне . . . . .	95
4.6	Итоги . . . . .	99
<b>5</b>	<b>Моделирование огибающей чандлеровского колебания и его возбуждения</b>	<b>100</b>
5.1	О целях главы . . . . .	100
5.2	Модель огибающей ЧДП . . . . .	102
5.3	Корректирующий фильтр Пантелеева как регуляризирую- щий алгоритм . . . . .	106
5.4	Вывод уравнения для огибающей чандлеровского колеба- ния и его возбуждения . . . . .	109
5.5	О 20-летней модуляции возбуждения . . . . .	110
5.6	О скачке фазы ЧДП и модуляции . . . . .	114

5.7	Эффект “эскарго” . . . . .	117
5.8	Еще раз о резонансе . . . . .	118
5.9	Выводы . . . . .	119
<b>6</b>	<b>Возбуждения в рамках обобщенного уравнения Эйлера-Лиувилля</b>	<b>120</b>
6.1	Реконструкция прямого и обратного чандлеровского возбуждений в рамках обобщенного уравнения . . . . .	120
6.2	Анализ и сравнение с геофизическим возбуждением . . . . .	124
6.3	Заключительные замечания . . . . .	129
<b>7</b>	<b>Анализ осевого углового момента атмосферы ААМ</b>	<b>130</b>
7.1	О влиянии зональной компоненты ААМ на LOD . . . . .	130
7.2	Использованные данные NCEP/NCAR . . . . .	133
7.3	Совместный МССА компонент ААМ ветра и давления . . . . .	138
7.4	Сравнение с данными ECMWF . . . . .	145
7.5	Выводы и дискуссия . . . . .	146
<b>8</b>	<b>О двух гармониках лунного прилива в ААМ</b>	<b>150</b>
8.1	Перевод углового момента в небесную систему координат . . . . .	150
8.2	Выявленные особенности небесного углового момента с периодами от 2 суток до 1 месяца . . . . .	154
8.3	Вычисление момента сил . . . . .	154
8.4	О приливной природе 13.6 - суточной гармоника . . . . .	156
8.5	Анализ 6-суточного пика в ААМ . . . . .	159
<b>9</b>	<b>Океан как фактор климата и его угловой момент</b>	<b>161</b>
9.1	На стыке климатологии и геофизики . . . . .	161
9.2	Тренды изменений климата . . . . .	162
9.3	Динамика океана и атмосферы, определяющая многолетние циклы . . . . .	168
9.4	Течения в Мировом океане и климат . . . . .	171
9.5	О возможной связи геофизических и социальных явлений . . . . .	175
9.6	Угловой момент океана ОАМ . . . . .	177
9.7	МССА-анализ экваториальной компоненты массы ОАМ . . . . .	179
9.8	Заключительные замечания . . . . .	186
<b>10</b>	<b>Анализ данных о гравитационном поле со спутников GRACE</b>	<b>188</b>
10.1	О миссии GRACE . . . . .	188
10.2	Обработка данных GRACE . . . . .	191

10.2.1	Подготовка исходных данных . . . . .	191
10.2.2	МССА-фильтрация данных GRACE . . . . .	192
10.3	Гидрология России по данным GRACE и GRACE-FO . . . . .	195
10.4	О роли GRACE при определении нестерической компонент ты изменений уровня моря . . . . .	203
10.5	Данные GRACE по массе океана . . . . .	205
10.6	Результаты МССА-обработки данных по массе океана . . . . .	206
10.7	Перспективы использования данных GRACE . . . . .	207
<b>11</b>	<b>Анализ первых гармоник гравитационного потенциала Земли</b>	<b>211</b>
11.1	Введение . . . . .	211
11.2	Источники рядов координат геоцентра . . . . .	212
11.3	Анализ рядов геоцентра . . . . .	214
11.4	Динамический форм-фактор $J_2$ по данным SLR и GRACE	218
11.5	Сингулярный спектральный анализ $J_2$ . . . . .	218
11.6	О влиянии коэффициентов гравитационного потенциала второй степени на вращение Земли. . . . .	222
11.7	Сопоставление трендов движения полюса и изменений $C_{21}$ , $S_{21}$ . . . . .	223
11.8	Вариации в скорости вращения Земли и $C_{20}$ . . . . .	228
11.9	О корреляциях, остающихся под вопросом . . . . .	232
11.10	Аномалии в скорости вращения Земли и ЧДП . . . . .	235
11.11	О 6-летних колебания LOD . . . . .	237
11.12	Итоги анализа первых коэффициентов геопотенциала . . . . .	239
<b>12</b>	<b>Статистический анализ прогнозов ПВЗ</b>	<b>242</b>
12.1	О прогнозировании ПВЗ . . . . .	242
12.2	Об использованных методах прогнозирования . . . . .	244
12.2.1	Метод наименьших квадратов . . . . .	244
12.2.2	Авторегрессия . . . . .	245
12.2.3	Средняя квадратическая коллокация . . . . .	245
12.2.4	Нейронные сети . . . . .	246
12.2.5	Прогнозы Шанхайской обсерватории . . . . .	247
12.2.6	Комбинированные прогнозы . . . . .	247
12.3	Статистический анализ результатов . . . . .	248
12.3.1	Погрешности ME и RMSE . . . . .	248
12.3.2	Пример отдельного прогноза . . . . .	248
12.3.3	Анализ отклонения прогнозов от наблюдений . . . . .	249
12.4	Выводы по выполнявшимся прогнозам . . . . .	257

Л.В. Зотов. Вращение Земли и климатические процессы	5
<b>Заключение</b>	<b>258</b>
<b>Приложения</b>	<b>263</b>
Приложение А	
Оконное преобразование . . . . .	263
Приложение Б	
Корректирующий фильтр Пантелеева . . . . .	265
Приложение В	
Многоканальный сингулярный спектральный анализ . . . . .	269
<b>Список литературы</b>	<b>276</b>
Работы автора . . . . .	276
Диссертации . . . . .	280
Книги, монографии, лекции . . . . .	281
Источники, содержащие особую точку зрения . . . . .	286
Статьи на русском языке . . . . .	286
Статьи на иностранных языках, классические . . . . .	289
Статьи на иностранных языках, современные . . . . .	290
Сайты, описания, технические записки . . . . .	304

# Предисловие

*В сердце каждого человека  
хранится одно правдивое послание,  
но оно погребено под обрывками  
обветшалых книг.  
В сердце каждого человека звучит  
один правдивый напев,  
но его заглушают распутные  
песенки и буйные крики.  
Тот кто предан учению,  
должен отмести все внешнее  
и напрямую постичь  
изначальное.  
Только тогда он поймет,  
что есть подлинного в жизни.  
Хун Цзичен “Вкус корней”,  
перевод В. Малявина*

Представленная вниманию читателей монография посвящена вращению Земли – классическому разделу астрономии и геодезии. В настоящее время эта область стала тесно соприкасаться с другими направлениями наук о Земле: геодинамикой, климатологией, океанологией, метеорологией, поскольку вращение планеты чувствительно к процессам в ее оболочках. Это и послужило расширению темы. В книге представлены исследования, которые проводились автором с 2001 года. Исторический обзор по вращению Земли, постановка вопросов и их предварительное решение были даны еще в кандидатской диссертации [55]. Нынешняя работа, составившая основу докторской диссертации, содержит более глубокую их разработку, ставшую возможной благодаря появлению новых данных, достижениями в изучении изменений климата, развитием космических средств наблюдений, альтиметрии, гравиметрии и др. Важность выбранных тем для решения прикладных задач, стремление применить передовые методы обработки и обнаружить новое руководили автором.

Основная часть работы посвящена рассмотрению движения полюса, в особенности чандлеровского колебания, изменчивости длительности суток LOD, их геофизическим причинам, анализу перераспределений масс. Некоторые вопросы, как например, взаимосвязь сейсмической и вулканической активности с вращением Земли, высокочастотные вариации параметров вращения Земли (ПВЗ) остались за кадром. Лишь косвенно затронуты вопросы моделирования прецессии и нутации, движений в ядре Земли, связанных с внутренними напряжениями в недрах и электромагнитным взаимодействием на границе ядро-мантия. Сколь ни



была бы обширна работа, она не может включить всех вопросов, лежащих на стыке традиционно геодезического предмета – вращения Земли и современной геофизики. В качестве оправдания можно сказать, что в наше время наука становится все более специализированной и по каждой из областей имеется такое количество исследований и литературы, что любая работа, если она обзорная, не обзрит всего, а если исследовательская, – во многом повторит уже сделанное. Автор старался ссылаться на предшественников, и надеется, что коллег, работающих по теме вращения Земли и не обнаруживших себя в списке литературы, будет мало. Если такие найдутся, то это не по причине предвзятости, а из-за обилия издаваемых материалов по предмету.

В 2016 году скорость вращения Земли начала увеличиваться и на момент издания монографии достигла существенного максимума, если сравнивать с измерениями за последние полвека. Чандлеровское колебание полюса также затухло в 2020 г. и, по всей видимости, сменило фазу. Эти удивительные особенности делают эпоху написания этой книги ключевой для поиска ответов на еще нерешенные вопросы, для объяснения многолетних вариаций LOD и движений полюса.

Большое внимание в книге уделено чандлеровскому колебанию: причинам его амплитудных модуляций, согласно геодезических и геофизических возбуждений в чандлеровском диапазоне частот, точности самой модели, задаваемой классическими и обобщенными уравнениями Эйлера-Лиувилля. Удалось ли автору открыть новое – судить не ему. Представленный текст – это продукт своего времени, и автору хотелось бы, чтобы в нём оказалось то, что не сразу уйдет в анналы истории, но останется актуальным и для следующего поколения. Нередко, открыв исследование какой-нибудь двадцати-тридцатилетней давности, удивишься тому, как быстро движется вперед наука. Интересы научного сообщества постоянно меняются, вчера еще передовые методы устаревают. Хочется верить, что десятилетия жизни, вложенные в представленную работу – не просто утраченное время. Впрочем, любой процесс творчества оправдывает сам себя и в некотором смысле является самоцелью.

Автор благодарит тех читателей, которые найдут в себе силы ознакомиться с монографией, и надеется, что им покажутся интересными сведения, накопленные в ходе наблюдений за вращением Земли, океаном, атмосферой, результаты компьютерного моделирования и некоторые теоретические идеи. Ориентируясь на развитие науки на Востоке и Западе, автор старался сохранять и развивать методологию и идеи отечественной школы.

Хотелось бы выразить благодарность Н.С. Сидоренкову, В.Л. Панте-

лееву, В.С. Губанову, Я.С. Яцкиву, С.Л. Пасынку, В.Л. Горшкову, Н.А. Чуйковой, С.М. Копейкину, А.Г. Яголе, Н.Л. Фроловой, Ю.Н. Авсюку, К.В. Куимову, Т.С. Чесноковой за полезные дискуссии и наставления, а также зарубежным коллегам: К. Бизуару, С.К. Шаму, В. Шену, С. Сю, Ю. Джоу, Дж. Гуо, Ч. Хуангу, Х. Феррандишу, А. Бжезинскому, И. Настуле, Р. Гроссу, В. Дехант и многим другим за поддержку и дискуссии.

Автор благодарен своим дипломникам в МИЭМ ВШЭ: Е. Щепловой, Е. Балакиревой, А. Скоробогатову, И. Сгибневу, В. Власовой, Х. Езиеву и А. Устинову, проявившим интерес к совместным исследованиям. С рядом из них автор опубликовал совместные статьи, результаты которых вошли в главы данной монографии. Он благодарен Б.П. Середину, чье обширное наследие книг по геофизике было передано автору внучкой Анной. При выполнении работы большую поддержку оказали близкие автору люди: мама Ольга Викторовна и жена Екатерина.

Первое знакомство с результатами работы спутников GRACE, вызвавшее интерес к проблемам изменения климата, состоялось в Школе наук о Земле Университета штата Огайо, США, где автор работал по гранту Фулбрайта в 2009-2010 гг. Появившаяся тогда идея применения многоканального сингулярного спектрального анализа (МССА) была разработана в 2010 г. По соответствующей теме был получен грант Президента России. Впоследствии большой интерес к этой теме проявили сотрудники географического и геологического факультетов МГУ. Работа по анализу угловых моментов атмосферы и океана на сетке велась в Шанхайской обсерватории по гранту Академии наук Китая для приглашенного ученого в 2011-2012 гг. Анализ чандлеровского колебания и возбуждающих функций был начат еще в кандидатской диссертации, далее проводился при поддержке Парижской обсерватории в ходе нескольких месячных стажировок. Исследование вариаций первых гармоник гравитационного поля было инициировано Ю.В. Баркиным, поддержано Н.А. Чуйковой и вылилось в исследование влияния внутренних структур Земли на вращение планеты. Эта работа продолжилась в Уханьском университете при поддержке программы “111” по инновациям инженерных дисциплин в современной геодезии и геодинاميке (NSFC No. B17033). Автор также благодарен грантам РФФИ, РНФ (No. 21-47-00008) и Школе Космос МГУ им. М.В. Ломоносова при поддержке которых проходило сотрудничество с интереснейшими научными коллективами и был опубликован ряд совместных работ, а также программе кадрового резерва НИУ ВШЭ и НУГ “Группа оперативного мониторинга” (No. 20-04-033).

15 марта 2022 г.

Л.В. Зотов

# Введение

*Всему времечко свое:  
Лить дождю, Земле вращаться,  
Знать, где первое прозреньё,  
Где последняя черта.  
Булат Окуджава*

Вращение Земли на протяжении веков было для человека мерилom времени. Восход и заход Солнца, его годовое движение легли в основу календаря, но не сразу человек осознал относительность движения, выявил законы механики, осознал фундаментальную истину того, что он и его планета – вовсе не центр Вселенной. Еще в древности Гиппарх (190-120 гг. до н.э.) открыл явление предварения равноденствий – прецессию. В Китае оно было открыто по смещению точки зимнего солнцестояния несколькими веками позже. Некоторые предания указывают на то, что об этом явлении могли догадываться еще в древнем Египте и Вавилоне [105, 191, 234]. В наше время смещение оси вращения Земли под действием моментов сил Луны и Солнца, вызывающих прецессию и нутацию, рассчитывается с высочайшей точностью. В XX веке, с изобретением атомных часов и развитием прецизионных методов астрометрии и космической геодезии, стало очевидно, что вращение Земли неравномерно, оно не может выступать основой точного счета времени. И хотя люди по-прежнему считают время часами, сутками и годами, хранение точного времени перешло из астрономии в область атомной физики. Подстройка атомного времени под вращение Земли выполняется путем добавления дополнительной секунды, решение о которой принимает Международная служба вращения Земли и систем отсчёта (МСВЗ) в Париже [517]. Смещение полюсов исследуется уже более века и наблюдается сегодня с точностью в десятки микросекунд дуги. Чтобы теория соответствовала точности наблюдений, необходимо моделировать и отслеживать процессы в океане, атмосфере и в недрах Земли. Однако для широкого диапазона частот столь высокое соответствие пока еще не достигнуто. Это связано с недостатком сведений о процессах в недрах планеты, особенно на продолжительных интервалах времени, погрешностями определения некоторых параметров внутреннего строения планеты, со сложной нелинейной динамикой взаимодействующих земных оболочек. И хотя от-

клик Земли на внешние воздействия во многом известен, стоит задача его уточнения.

Связь земной и небесной систем координат для высокоточной навигации и позиционирования, проведения космических исследований и др. требует постоянного усовершенствования физических моделей вращения планеты и методов прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ), к которым относят отличие всемирного времени UT1 от атомного TAI (либо длительность суток LOD), поправки к углам прецессии-нутаии  $d\psi$ ,  $d\varepsilon$  (к координатам небесного полюса  $dX$ ,  $dY$ ), координаты полюса  $x$ ,  $y$  в земной системе. Углы ориентации Земли входят в матрицы преобразований между системами координат, их выбор во многом продиктован требованием удобства выполнения таких преобразований.

Неравномерности во вращении Земли являются своего рода сводным откликом на процессы в ближнем Космосе, в оболочках Земли и её недрах. Приливы от внешних тел деформируют Землю, меняя её тензор инерции, создают внешний момент сил, источник которого – гравитационный потенциал. Течения в океане, изменения в циркуляции атмосферы, взаимодействия на границе ядра и мантии приводят к обмену моментом импульса и энергией и также влияют на вращение Земли. Подсчитать энергию в диссипативных системах весьма сложно, поэтому в расчетах обычно пользуются законом сохранения импульса. Величины изменений ПВЗ невелики – сантиметры, максимум метры для движения полюса и миллисекунды времени для продолжительности суток. Однако наблюдения этих малых отклонений дают ключ к пониманию физики планеты, её реологии и строения, позволяют определить упругие свойства, добротность, сжатие – параметры, определяющие динамический отклик Земли на астрономические и геофизические возбуждения. Изучение вращения Земли при повышении точности наблюдений позволяет улучшить модели ее внутреннего строения, модели глобальной циркуляции (GCM) океана и атмосферы и выявить еще не учтенные факторы.

В данной работе мы попытаемся дать некоторые представления о взаимном влиянии вращения Земли и геофизических процессов. С использованием накопленных за десятилетия наблюдений за океаном, атмосферой, гравитационным полем планеты, мы иллюстрируем их взаимосвязь с вращением Земли и намечаем дальнейшие перспективные направления исследований. Для этого мы используем математические методы фильтрации и анализа многомерных данных, динамические модели, законы механики для вращающейся многослойной вязко-упругой Земли, методы решения обратных задач и др. Как уже говорилось в предисловии, наша задача состоит не в полном охвате всех тем, а в тщательной прора-

ботке определенных вопросов. По прочим направлениям мы стараемся привести ссылки на дополнительную литературу.

Тем, кому интересна история исследований вращения Земли, мы рекомендуем обратиться к [55], прочитать интервью с В.А. Наумовым в популярной книге [108], заметку М.С. Зверева об А.А. Михайлове [208], труды О.А. Орлова [219, 220], биографию Е.П. Федорова [111]. Для читателей, которые сочтут недостаточными теоретические выкладки по вращению Земли в главе 2, мы рекомендуем обширный ряд монографий [123, 124, 177, 178, 182] наряду с недавно вышедшими книгами В. Дехант и П. Мэтьюса [166], а также К. Бизуара [163, 164]. Что касается взаимосвязи сейсмичности и вращения Земли, в последнее время в печати появляется немало противоречивых заявлений [501]. В научной литературе мнения на этот счет расходятся [238, 382]. О том, как меняются напряжения в земной коре при ускорении/замедлении вращения Земли, говорится в диссертации [61], работах [223, 374], любопытный исторический обзор дан в [194]. В кандидатской диссертации автора [55] также выполнено моделирование влияния Суматранского землетрясения 2004 г. на вращение Земли. С темой электромагнитных взаимодействий на границе ядро-мантии и движениями внутреннего ядра, вызывающими большой интерес у теоретиков, можно познакомиться в [75, 224, 324, 308].

Одним из основных сюжетов представленной работы выступает исследование чандлеровского движения полюса, для которого методом корректирующей фильтрации В.Л. Пантелеева удалось восстановить возбуждающие функции и обнаружить их квази-20-летние модуляции. При разработке этой темы мы воспользовались многолетними наблюдениями, хранящимися в центре данных ЕОР РС по вращению Земли в Париже. Подробнее о наблюдательных данных будет сказано в первой главе. Теоретические сведения о вращении Земли даны в главе 2. Во третьей главе работы представлена обобщенная модель уравнений Эйлера-Лиувилля, ее анализ проводится в главе 6. На основе фильтра Пантелеева, представленного в приложении Б, в главах 4, 5 ведется исследование чандлеровского возбуждения.

Исследование угловых моментов атмосферы и океана на сетке в главах 7, 9, и анализ данных GRACE и GRACE-FO в главе 10 проводится с использованием многоканального сингулярного спектрального анализа (МССА), представленного в приложении В. На его одномерную версию – метод “гусеницы-ССА” автору в свое время указал С.Л. Пасынок. К теории фильтрации интерес автора привлек В.Л. Пантелеев, он же инициировал написание учебника [30]. На работы А.А. Любушина и его книгу [118], содержащую множество математических методов обработки

временных рядов, обратил внимание М.В. Баринов. Результаты их применения к данным GRACE, с которыми автора познакомил С.К. Шам, вызвали большой интерес гидрологов Московского университета под руководством Н.Л. Фроловой. Это способствовало проведению исследований распределения масс в бассейнах крупных рек России. Работы В.Д. Юшикина [24] с абсолютными гравиметрами послужили для сопоставлений космической и наземной гравиметрии.

Изучая влияние внешних сил на колебания ядра, Ю.В. Баркин [225, 264] инициировал предпринятый нами в главе 11 анализ коэффициентов гравитационного поля, отражающих смещение геоцентра. Интерес к анализу коэффициентов разложения второй степени возник благодаря работам Н.А. Чуйковой [240] с коллегами по исследованию движений земной коры и внутренних напряжений. Это вылилось в исследования дрейфа полюса под действием глобального перераспределения масс.

Исследование эффективных угловых моментов атмосферы и влияния на них лунных приливов в главе 8 вдохновлено Н.С. Сидоренковым [182]. Его предположение о важной роли лунных приливов в атмосферной изменчивости нашло, по крайней мере частично, своё подтверждение. Предположение о том, что 18.6-летняя прецессия орбиты Луны приводит к существенным изменениям в геофизических процессах и, возможно, связана с чандлеровским колебанием, неоднократно высказывал Ю.Н. Авсюк [261].

В XI веке аль-Бируни писал: “Следует постоянно следить за широтами, иначе города могут достичь губительных местностей, что погубит их” [90, 234]. Согласно гипотезе Миланковича, ответственность за ледниковые периоды лежит на изменениях параметров орбиты Земли и положения её оси [126]. Задавшись вопросом, возможна ли взаимосвязь между вращением Земли и изменениями климата на интервалах времени в несколько десятилетий, мы проанализировали ряды продолжительности суток и движения полюса, а также климатические индексы. Результаты, представленные в главах 9, 11, говорят о наличии таких взаимосвязей. Эти исследования в русле работ Н.Сидоренкова, А.С. Моница [126], И.В. Максимова [120], К. Ламбека [177] и др. на наших глазах получают новый виток развития [256, 297, 296]. На ассамблее Азиатско-Тихоокеанского геофизического союза AOGS-2016 работала междисциплинарная секция “Изменения климата и движение полюса”. Президент комиссии по вращению Земли Международного астрономического союза (МАС), Р. Гросс, в своем интервью газете “Informacion Alicante” от 26.09.2017 высказался о взаимосвязи изменений климата и вращения Земли. Создана комиссия ICSS C.1 “Климатические сигналы в параметрах вращения Земли”.