

ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

научный и общественно-политический журнал

том 92 № 1 2022 Январь

Основан в 1931 г.
Выходит 12 раз в год
ISSN: 0869-5873

*Журнал издаётся под руководством
Президиума РАН*

Главный редактор
А.Р. Хохлов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.В. Адрианов, В.П. Анаников, Ю.Д. Апресян, А.Л. Асеев,
Л.И. Бородин, В.В. Бражкин, В.А. Васильев, А.И. Григорьев,
А.А. Гусейнов, Г.А. Заикина (заместитель главного редактора),
Л.М. Зелёный, Н.И. Иванова,
А.И. Иванчик (заместитель главного редактора),
С.В. Кривовичев, А.П. Кулешов, А.Н. Лагарьков, Ю.Ф. Лачуга,
А.Г. Лисицын-Светланов, А.В. Лопатин, А.М. Молдован,
В.И. Молодин, В.В. Наумкин, С.А. Недоспасов, А.Д. Некипелов,
Р.И. Нигматулин, Н.Э. Нифантьев, А.Н. Паршин,
В.М. Полтерович, С.М. Рогов, Г.Н. Рыкованов,
Р.Л. Смелянский, О.Н. Соломина, В.А. Тишков, В.А. Ткачук,
А.А. Тотолян, М.А. Федонкин, Т.Я. Хабриева,
Е.А. Хазанов, В.И. Цетлин, В.А. Черешнев,
В.П. Чехонин, И.А. Щербаков, А.В. Юревич

Заместитель главного редактора
Г.А. Заикина

Заведующая редакцией
О.Н. Смола

E-mail: vestnik@eco-vector.com, vestnik@pleiadesonline.com

Москва

ООО «Объединённая редакция»

Оригинал-макет подготовлен ООО «ИКЦ «АКАДЕМКНИГА»

© Российская академия наук, 2022

© Редколлегия журнала
“Вестник РАН” (составитель), 2022

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-67137 от 16 сентября 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

| | | | |
|----------------------------------|--|--------------------|-------------------|
| Подписано к печати 11.01.2022 г. | Формат 60 × 88 ¹ / ₈ | Усл. печ. л. 11.98 | Уч.-изд. л. 12.25 |
| Тираж 161 экз. | Зак. 3970 | Цена договорная | |

Учредитель: Российская академия наук

Издатель: Российская академия наук, 119991 Москва, Ленинский просп., 14
Исполнитель по госконтракту № 4У-ЭА-068-20 ООО «Объединённая редакция»,
109028, г. Москва, Подкопаевский пер., д. 5, каб. 6
Отпечатано в типографии «Book Jet» (ИП Коняхин А.В.),
390005, г. Рязань, ул. Пушкина, 18, тел. (4912) 466-151

16+

СОДЕРЖАНИЕ

Том 92, номер 1, 2022

С кафедры президиума РАН

И. И. Мохов

Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования 3

Обозрение

А. А. Ярославов, М. С. Аржаков, А. Р. Хохлов

Жизненный цикл полимерного материала: проблемы и перспективы 15

А. Н. Богданов

Механика. 100 лет без Н.Е. Жуковского 23

Точка зрения

Б. Л. Лавровский, Е. А. Горюшкина, Е. А. Шильцин

Моделирование бюджетной обеспеченности регионов 35

Из рабочей тетради исследователя

Р. Л. Смелянский

МС2Е — метаоблачная вычислительная среда для междисциплинарных исследований 46

А. С. Цветков

Основные статистическо-кинематические свойства каталога GAIA EDR3 57

Организация исследовательской деятельности

А. И. Терехов

Позиционирование России в появляющихся высокотехнологичных направлениях 74

За рубежом

Д. М. Бондаренко

Историко-культурные аспекты формирования наций в постколониальных государствах Африки 86

В мире книг

Рецензируется: Д. О. Иванов, А. И. Мелуа, А. Д. Ноздрачев. Академики Победы. 97

CONTENTS

Vol. 92, No. 1, 2022

From the Rostrum of the RAS Presidium

I. I. Mokhov

Climate Changes: Causes, Risks, Consequences, Adaptation and Regulation Problems 3

Review

A. A. Yaroslavov, M. S. Arzhakov, A. R. Khokhlov

Life Cycle of Polymeric Materials: Problems and Prospects 15

A. N. Bogdanov

Mechanics. 100 years without N.E. Zhukovsky 23

Point of View

B. L. Lavrovsky, E. A. Goryushkina, E. A. Shiltsin

Modeling of Budgetary Security of Regions 35

From the Researcher's Notebook

R. L. Smelyansky

MC2E – a Meta-Cloud Computing Environment for Interdisciplinary Research 46

A. S. Tsvetkov

Basic Statistical-Kinematic Properties of the GAIA EDR3 Catalogue 57

Organization of research

A. I. Terekhov

Russian Science in New Emerging High-Tech Fields 74

Abroad

D. M. Bondarenko

The Historical and Cultural Aspects of Nation Building in Postcolonial African States 86

In the Book World

Review of the book by D. O. Ivanov, A. I. Melua, and A. D. Nozdrachev.
Academicians of Victory

97

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: ПРИЧИНЫ, РИСКИ, ПОСЛЕДСТВИЯ, ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

© 2022 г. И. И. Мохов^{a,b}

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

^bМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: mokhov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 02.08.2021 г.

После доработки 12.08.2021 г.

Принята к публикации 20.08.2021 г.

Обращаясь к популярной ныне теме глобальных изменений климата — его потепления, особенно в высоких широтах, автор — сопредседатель Научного совета РАН по проблемам климата Земли — подробно анализирует тенденции наблюдаемых температурных вариаций, их глобальные и региональные особенности. В статье отмечается, что повышение глобальной приповерхностной температуры сопровождается быстрым ростом числа природных катастроф, в первую очередь вследствие гидрологических и метеорологических аномалий. Утверждается, что климатические аномалии последних лет свидетельствуют не только об увеличении риска экстремальных региональных событий, но и о новых процессах и явлениях, характеризующих достижение определённого критического уровня климатических изменений. Согласно результатам анализа современных изменений климата с использованием модельных оценок с учётом естественных и антропогенных факторов в результате быстрого потепления в последние десятилетия земная климатическая система достигла режима, сопоставимого с режимом оптимума голоцена, считает автор.

Статья основана на материалах доклада, представленного автором на заседании президиума РАН 13 октября 2020 г.

Ключевые слова: глобальные и региональные изменения климата, естественные и антропогенные факторы, экстремальные явления и процессы, климатические модели, проблемы адаптации и регулирования.

DOI: 10.31857/S0869587322010066

Последние десятилетия характеризуются значительными глобальными и региональными климатическими изменениями, особенно в высоких широтах [1–4]. Климатические изменения — одна из ключевых проблем нашего времени. Повыше-



МОХОВ Игорь Иванович — академик РАН, научный руководитель ИФА им. А.М. Обухова РАН, заведующий кафедрой физики атмосферы физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

ние глобальной приповерхностной температуры сопровождается быстрым ростом числа природных катастроф, в первую очередь вследствие гидрологических и метеорологических аномалий. На рисунке 1 показаны тренды среднегодовой температуры у поверхности для разных широт в 1980–2019 гг. с максимальным потеплением до 4°C и более в арктических широтах (по данным GISS, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>). Наибольшая скорость температурных изменений в арктических широтах (так называемое Арктическое усиление) формируется под влиянием ряда климатических обратных связей, в том числе из-за зависимости альбедо поверхности от температуры.

Рисунок 2 характеризует межгодовые изменения приповерхностной температуры (аномалии относительно базового периода 1951–1980 гг.) в

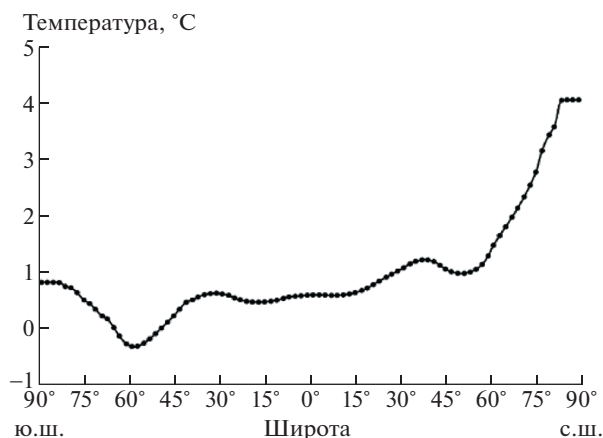


Рис. 1. Изменения среднегодовой приповерхностной температуры на разных широтах Северного и Южного полушарий, 1980–2019 гг.

Арктике в сопоставлении с соответствующими вариациями в средних и тропических широтах Северного полушария и для Земли в целом на основе данных наблюдений (<http://www.metoffice.gov.uk/>) [5]. Во внутривековых температурных региональных (в частности, в атлантическом секторе Арктики), полушарных и глобальных вариациях, а также в изменениях ледовитости арктических морей значимо проявляются вариации с временным масштабом в несколько десятилетий, типичным для Атлантической мультideсятилетней осцилляции (АМО). Согласно модельным расчётам, АМО связана с соответствующими вариациями глобальной термохалинной циркуляции океана, одна из ветвей которой — Гольфстрим. Влияние этого глобального океанического конвейера определяет существенный утепляющий эффект в Северной Атлантике и атлантическом секторе Арктики.

По данным, регистрируемым с XIX в., глобальная приповерхностная температура в по-

следние годы и десятилетия была самой высокой. Наблюдения свидетельствуют (<https://cruta-uea.ac.uk/cru/data/temperature/>), что в последнее десятилетие (2011–2020 гг.) она была на 0.2 К выше относительно 2001–2010 гг., на 0.4 К — относительно 1991–2000 гг., на 0.6 К — относительно 1981–1990 гг. и на 0.8 К — относительно 1971–1980 гг. Скорость глобального потепления впечатляет, особенно в сопоставлении с целями Парижского соглашения 2015 г. об изменении климата, в котором ставится цель не допустить глобальное потепление более чем на 1.5 К, в крайнем случае на 2 К, относительно доиндустриального периода.

Наиболее заметно новые тенденции проявляются в повторяемости и интенсивности экстремальных региональных явлений и процессов [1, 2]. На фоне общего потепления отмечается усиление климатической изменчивости — “нервозности” климата. По данным Росгидромета (<http://www.meteorf.ru>), число опасных метеорологических явлений за последние два десятилетия увеличилось примерно втрое на фоне быстрого потепления в России — со скоростью примерно 0.5 К за десятилетие (в два с половиной раза быстрее глобального), а в ряде регионов — около 1 К за десятилетие (рис. 3). Существенно, что наибольшее количество гидрометеорологических аномалий отмечается в российских регионах в тёплые месяцы — чаще летом. Число опасных явлений в России с 1998 по 2019 г. увеличивалось в среднем на 21 событие в год, а летом (40% общего количества за год) — в среднем на 10 событий в год. В частности, для летних сезонов последних лет отмечена статистически значимая связь (на уровне 90%) количества опасных метеорологических явлений с температурными аномалиями в российских регионах — с его ростом на 45% при увеличении приповерхностной температуры на 1 К для России в целом. Следует отметить, что в последние годы в московском регионе впервые — во время шквалов в 2017 г. и 2018 г. — зарегистрирована

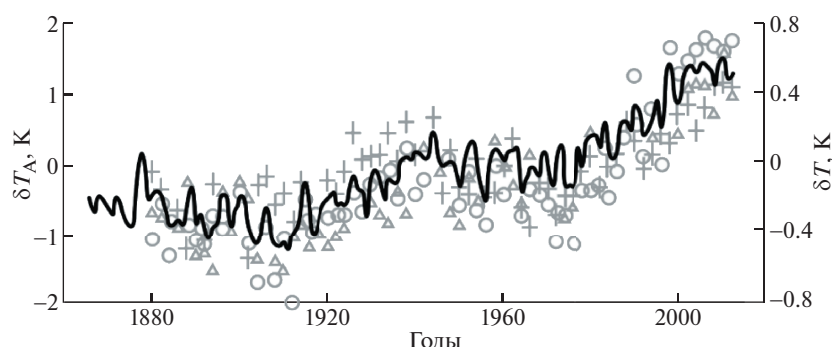


Рис. 2. Межгодовые вариации аномалий приповерхностной температуры в Арктике δT_A (крестики), в средних (кружки) и тропических (треугольники) широтах Северного полушария (левая шкала), а также для Земли в целом δT (жирная кривая, правая шкала)

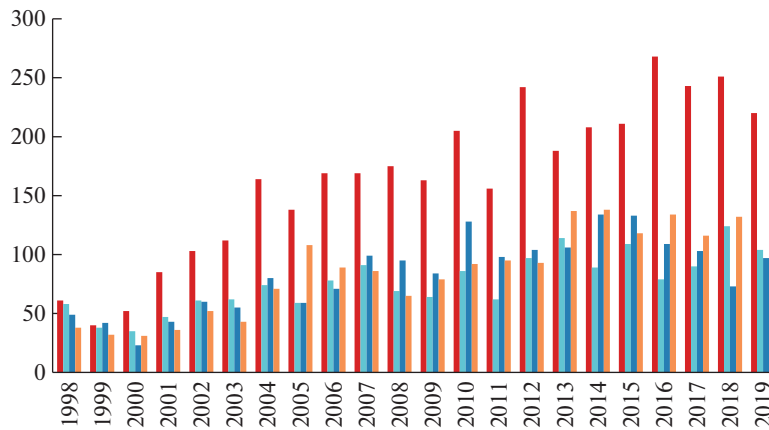


Рис. 3. Межгодовые изменения количества опасных метеорологических явлений в России: 1 – летом, 2 – осенью, 3 – зимой, 4 – весной

ураганная скорость ветра (более 33 м/с) в пределах приземного слоя атмосферы.

Как соотносятся современные изменения климата с изменениями прошлых эпох? По данным палеорекоonstrukций, в течение последних десятков миллионов лет температура у поверхности Земли падала до некоторого критического режима – наступления так называемого плейстоцена около 2 млн лет назад. Для плейстоцена характерны ледниковые циклы, связанные с изменениями параметров орбиты Земли вокруг Солнца (эксцентриситета, угла наклона земной оси к плоскости эклиптики и прецессии) с периодами около 100, 40 и 20 тыс. лет – циклами Миланковича. Проявлению этих циклов в четвертичном периоде способствовала положительная обратная связь альbedo поверхности Земли – температура, в формировании которой значимую роль играет снежно-ледовый покров. Анализ содержания пузырьков воздуха в ледовых ядрах российской антарктической станции Восток, а впоследствии по данным международного проекта EPICA, выявил соответствующие температурным циклам вариации атмосферных компонентов, включая парниковые газы, углекислый газ и метан. Отмеченное при этом некоторое общее запаздывание вариаций их содержания относительно температурных изменений нередко используется в качестве аргумента против признания антропогенных причин современных изменений климата. На самом деле противоречий тут нет. Изменения связаны с разными механизмами радиационного воздействия на климат и на углеродный цикл Земли, которые значительно различаются по своим временным масштабам. Существенно, что только по запаздыванию нельзя судить о причинно-следственных связях в земной климатической системе. Знак временного сдвига зависит от ряда факторов, характеризующих систему и тип её возмущений, включая временные масштабы [6]. В настоящее

время Земля находится в межледниковье на температурном пике ледникового цикла – в так называемом голоцене – уже более 11 тыс. лет. После достижения максимального температурного режима – оптимума голоцена около 6 тыс. лет назад, температура в целом понижалась (до наступления индустриальной эпохи).

В последнее столетие ситуация принципиально изменилась: по данным наблюдений, на фоне естественной изменчивости отмечается заметное глобальное потепление, которое связывается с антропогенными воздействиями, прежде всего с ростом содержания в атмосфере таких парниковых газов, как углекислый газ и метан. Модельные прогностические оценки свидетельствуют о формировании новой эпохи – антропоцена. При этом согласно модельным расчётам, уже для сотен тысяч лет в зависимости от уровня антропогенных эмиссий парниковых газов с учётом потенциала метангидратов (на суше и на шельфе) возможно существенное замедление (до десятков тысяч лет) наступления очередного ледникового периода и даже пропуск очередного цикла [7]. В последние годы содержание CO_2 в земной атмосфере превысило знаковый рубеж – 400 млн⁻¹ и продолжает увеличиваться, в 2020 г. на станции Мауна Лоа содержание CO_2 уже составило около 420 млн⁻¹. На российской арктической станции Териберка на Кольском полуострове (69° с.ш., 35° в.д.) к концу 2020 г. концентрация CO_2 в атмосфере достигла уровня 427 млн⁻¹, то есть доиндустриальный уровень (280 млн⁻¹) превышен в полтора раза. Сравнение с палеорекоonstrukциями свидетельствует о рекордном содержании CO_2 в течение последнего миллиона лет. В истории Земли содержание углекислого газа достигало и на порядок больших значений, но человечество никогда не жило при таких концентрациях CO_2 в атмосфере (пока не опасных для здоровья людей).

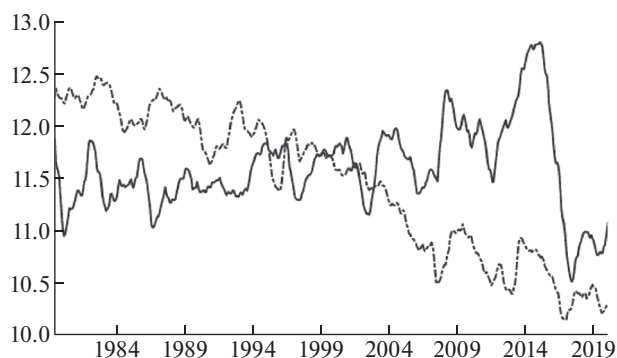


Рис. 4. Изменение площади арктических (пунктир) и антарктических (сплошная кривая) морских льдов (млн км²) по среднемесячным данным для периода 1978–2020 гг. при скользящем годовом осреднении

По данным метеонаблюдений, с XIX в. скорость общего роста приповерхностной температуры над сушей заметно больше, чем над океаном. Это связано с океанической инерционностью, проявляющейся в том числе в меньших межгодовых вариациях температуры. С середины XX в. отмечается значимый рост теплосодержания Мирового океана [8]. На фоне увеличения глобальной приповерхностной температуры проявляются её сильнее межгодовые вариации, связанные с явлениями Эль-Ниньо. В фазе Эль-Ниньо, как это было в начале 2020 г., при положительных аномалиях температуры Тихого океана в экваториальных широтах глобальная температура у поверхности обычно выше, а в противоположной фазе (Ла-Нинья) ниже, чем в нейтральные годы. Согласно прогностическим оценкам (см., например, <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>), ещё весной 2020 г. с высокой вероятностью ожидалось, что 2021 г. начнётся в фазе Ла-Нинья, соответственно можно было предполагать, что этот год будет в среднем по миру холоднее 2020 г. [9].

С середины XX в. (<https://data.giss.nasa.gov>) отмечается приповерхностное потепление во всех широтных зонах с максимальной скоростью в арктических широтах и минимальной для океанического пояса в субантарктических широтах. При этом на фоне долгопериодного потепления для более короткого 40-летнего интервала (1980–2019 гг.) в субантарктических широтах отмечалось понижение температуры у поверхности при быстром потеплении в Арктике (см. рис. 1). Выявленные температурные особенности свидетельствуют о значимости естественных вариаций климата с периодами порядка нескольких десятилетий, в частности для антарктических и субантарктических широт с морскими льдами. Отмеченные температурные особенности проясняют проблему разнонаправленных изменений по спутниковым данным, доступным только с 1979 г., с резким

уменьшением протяжённости морских льдов в Антарктике после 2016 г.

В связи с быстрым потеплением в Арктике в последние десятилетия отмечается резкое сокращение общей протяжённости морских льдов [10–12]. При этом одна из ключевых климатических проблем последних лет связана с различными тенденциями изменения ледовитости в Арктике и Антарктике (рис. 4). Общая протяжённость антарктических морских льдов по спутниковым данным с конца 1970-х годов росла, хотя и неравномерно и статистически незначимо. В результате к 2014 г. её среднегодовая площадь достигла рекордно высокого уровня — почти 13 млн км². Но с 2016 г. последовало резкое уменьшение этой площади с достижением рекордно низких значений, по сравнению с концом 1970-х годов. На фоне быстрого сокращения общей протяжённости морских льдов в Арктике в связи сильным арктическим потеплением изменения ледовитости в субантарктических и антарктических акваториях при относительно слабых соответствующих температурных вариациях связаны со значимым влиянием естественных мод климатической изменчивости. При этом в последние два десятилетия проявляется более значимая когерентность долгопериодных вариаций общей протяжённости и площади антарктических морских льдов с температурным режимом в Антарктике и для Южного полушария в целом. Отмеченное в последние годы резкое уменьшение общей протяжённости морских льдов в Антарктике — индикатор возможного начала ожидаемой на основе прогностических модельных оценок долгопериодной тенденции ослабления ледовитости в Южном полушарии при глобальном потеплении [4, 13].

Внутривековые климатические изменения в разных широтных зонах и для Земли в целом обнаруживают общие закономерности, при этом в арктических широтах изменения существенно сильнее (см. рис. 2). Во внутривековой температурной изменчивости значимо проявляются вариации с временным масштабом около шести десятилетий, характерные для АМО. В работе [12] проведён анализ условий влияния климатических мод с характерным временным масштабом до нескольких десятилетий на фоне вековой тенденции потепления на региональном и глобальном уровне. В простейшем случае гармонического колебания температуры $T(t)$ с периодом T_0 и амплитудой ΔT на фоне векового линейного тренда $(dT/dt)_c$ условие отсутствия временного интервала с похолоданием сводится к условию

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_c / \left(\frac{2\pi\Delta T}{T_0}\right) \geq 1.$$

С использованием данных о приповерхностной температуре начиная с XIX в. получены оцен-

Таблица 1. Оценки вклада парниковых газов в изменения (тренды) приповерхностной температуры для периодов разной продолжительности относительно современного режима (в прошлые десятилетия), по данным с конца XIX в.

| Период, годы | Глобальное осреднение | Тропические широты | Средние широты | Высокие широты |
|--------------|-----------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 20 | 0.6 | 0.6 | 0.4 | 0.3 |
| 30 | 0.6 | 0.7 | 0.4 | 0.4 |
| 50 | 0.8 | 0.9 | 0.7 | 0.6 |
| 130 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |

Таблица 2. Относительный вклад естественных вариаций (АМО) и парниковых газов в изменения (тренды) приповерхностной температуры для периодов разной продолжительности относительно современного режима (в прошлые десятилетия), по данным с конца XIX в.

| Период, годы | Глобальное осреднение | Тропические широты | Средние широты | Высокие широты |
|--------------|-----------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 20 | 0.8 | 0.7 | 1.0 | 1.0 |
| 30 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.7 |
| 50 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 |
| 130 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

ки для Северного полушария в целом с амплитудой приповерхностных температурных осцилляций $(\Delta T)_{NH}$ с периодом T_0 около 60 лет (как для АМО) около 0.2 К (при минимальной оценке около 0.1 К). При столетнем тренде приповерхностной температуры для Северного полушария в целом для отсутствия временного похолодания необходимо и достаточно, чтобы амплитуда соответствующих температурных осцилляций $(\Delta T)_{NH}$ с периодом T_0 (около 60 лет) не превышала $(\Delta T)_{NH}(T_0/2\pi) = 0.1$ К. Аналогичные оценки получены для амплитуды осцилляций ΔT_A с периодом T_0 примерно 60 лет для Арктики в целом — около 0.3 К (при максимальной оценке около 0.4 К и минимальной около 0.2 К). При столетнем тренде приповерхностной температуры для Арктики в целом $(dT/dt)_A = 2.4$ К/100 лет для отсутствия соответствующего интервала временного похолодания необходимо и достаточно, чтобы амплитуда температурных осцилляций ΔT_A с периодом T_0 около 60 лет не превышала $(dT/dt)_A(T_0/2\pi) = 0.2$ К. Согласно полученным оценкам, возможно замедление скорости потепления и даже некоторое локальное похолодание в течение одного-двух десятилетий с последующим более быстрым потеплением и в Арктике, и на полушарном (глобальном) уровне [12].

Какова роль различных естественных и антропогенных факторов в происходящих изменениях климата на разных временных интервалах? В таб-

лице 1 представлены оценки вклада парниковых газов, а в таблице 2 — вклада естественных вариаций (АМО) в тренды приповерхностной температуры для предыдущих десятилетий на временных интервалах разной продолжительности (относительно современного режима), полученные с использованием многолетних данных с конца XIX в. (наряду с оценками причинности по Винеру—Грейнджеру) [5]. Аналогичные оценки получены на основе учёта различных ключевых процессов (мод) климатической изменчивости, связанных с Эль-Ниньо, тихоокеанской десятилетней осцилляцией (ТДО), тихоокеанской междесятилетней осцилляцией и антарктической осцилляцией, которые значимы и в Северном и в Южном полушариях.

Согласно полученным оценкам, вклад антропогенных факторов в изменения (тренды) приповерхностной температуры в арктических широтах составляет не более одной трети на временных интервалах до двух десятков лет, достигает двух пятых для 30-летнего периода, а на интервалах около полувека и более уже превышает половину [5]. При этом для других широтных зон Северного полушария и для Земли в целом роль антропогенных факторов оказывается более значимой. Это связано с большой естественной климатической изменчивостью в арктических широтах (см. табл. 2). Вклад ключевых мод климатической изменчивости на сравнительно коротких временных интервалах в пределах трёх десятилетий достигает и мо-

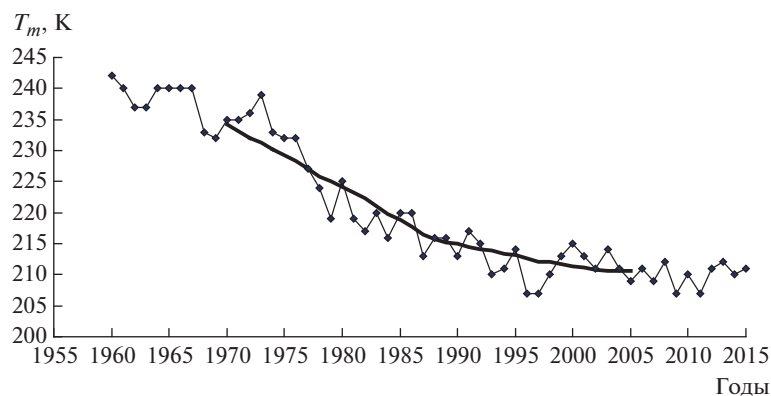


Рис. 5. Межгодовые вариации зимней температуры в области мезопаузы T_m (K) по измерениям на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 1960–2015 гг. Кривая характеризует температурные изменения при 21-летнем скользящем осреднении

жет превышать (по модулю) ± 0.2 K/десятилетие, а на интервалах около полувека и более их роль в вариациях приповерхностной температуры разных широт уже незначительна на фоне общего роста роли радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере. Вклад парниковых газов в тренды приповерхностной температуры разных широтных зон в целом увеличивается и в последние десятилетия достигает и превышает 0.2 K/десятилетие.

Существенно, что при глобальном потеплении трансформируется вертикальная температурная стратификация атмосферы, характеризующая статическую устойчивость и конвективную неустойчивость тропосферы [14]. С изменениями вертикальной температурной стратификации атмосферы, её статической устойчивости связаны изменения конвективных процессов в атмосфере, режимов облачности, осадков, вихре-волновой активности. Генерация внетропических циклонов в результате бароклинной неустойчивости атмосферы зависит как от меридионального градиента температуры, так и от вертикальной температурной стратификации атмосферы. От климатической обратной связи через вертикальный градиент температуры в тропосфере существенно зависит арктическое усиление, чувствительность климата к различным воздействиям. Особенно существенные изменения отмечаются в высоких и средних широтах.

Глобальное потепление проявляется в тропосфере, а выше — в стратосфере и мезосфере, отмечается существенно более сильное понижение температуры (рис. 5) [15]. Это важный индикатор, характеризующий роль антропогенных факторов. Согласно работе [16] условие выхолаживания стратосферы, характеризуемой температурой T_{st} и интегральной функцией пропускания инфракрасного излучения D_{st} (<1), при увеличении содержания в атмосфере парникового (углекисло-

го) газа q с ростом приповерхностной температуры T ($dT/dq > 0$) можно представить в виде

$$(dD_{st}/dq) < 4(1 - D_{st})(dT_{st}/dT)(dT/dq)/T_{st}$$

($dT_{st}/dT < 0$ связано с $dD_{st}/dq < 0$). Модельные оценки вековых изменений температуры на разных широтах и высотах в атмосфере с конца XIX в., связанные с разными естественными и антропогенными воздействиями, свидетельствуют о значимости изменения содержания парниковых газов в атмосфере [17]. Увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере приводит к потеплению в тропосфере и похолоданию в стратосфере. С изменениями с конца XIX в. концентрации сульфатного аэрозоля связано общее похолодание в тропосфере, а с изменениями концентрации атмосферного озона — потепление в тропосфере и похолодание в стратосфере, особенно в высоких широтах. Эти факторы вносят основной вклад в антропогенное воздействие на климатическую систему. Существенное влияние на формирование естественной климатической изменчивости, но не на современные долгопериодные (внутривековые) вариации, оказывает солнечная и вулканическая активность. Усиление потока солнечного излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы, отражается в общем потеплении всей атмосферы. В целом усиление вулканической активности приводит к похолоданию на поверхности земли и в тропосфере, сопровождающемуся потеплением в стратосфере. Суммарное воздействие как антропогенных, так и естественных факторов проявляется в потеплении тропосферы и похолодании стратосферы.

Климатические изменения последних десятилетий, характеризующиеся общим увеличением приповерхностной температуры, проявляются во всех компонентах земной климатической системы — атмосфере, гидросфере (океане), деятель-

ном слое суши (литосфере), криосфере и биосфере. Существенные изменения отмечаются в режиме осадков, засух (пожаров) и наводнений, снежного покрова, влагосодержания почвы, речного стока, морских льдов, вечной мерзлоты, циклонической и антициклонической активности в атмосфере и др.

Тенденция увеличения в последние десятилетия частоты экстремальных гидрометеорологических явлений, в частности в российских регионах, связана с тем, что при потеплении согласно уравнению Клапейрона–Клаузиуса растёт влагоёмкость атмосферы, что увеличивает вероятность мощных осадков. В случае ослабления зональной тропосферной циркуляции при потеплении с уменьшением меридионального градиента температуры и усилением роли меридиональных процессов влага не столь эффективно переносится в глубь континентов, и это способствует большей пространственной неоднородности осадков и увеличению вероятности как избыточных осадков (наводнений), так и их дефицита (засух с пожарами) в сопредельных регионах [18, 19]. (Следует отметить, что в поясе широт от средних до субполярных зональная скорость ветра в тропосфере в условиях глобального потепления может увеличиваться при усилении субтропического струйного течения из-за охлаждения стратосферы.) На фоне большой изменчивости поля осадков проявляются существенные различия региональных тенденций и чувствительности общего количества осадков (Pr), их интенсивности (I_{Pr}) и вероятности (f_{Pr}):

$$(dPr/dT)/Pr = (dI_{Pr}/dT)/I_{Pr} + (df_{Pr}/dT)/f_{Pr}.$$

В среднеширотных российских регионах отмечаются различия тенденций изменения вероятности зимних и летних осадков. При потеплении проявляется общее увеличение и интенсивности, и частоты зимних осадков, а для летних осадков при общем росте интенсивности — уменьшение их частоты, что способствует возникновению летом как засух, так и наводнений.

Увеличение влагоёмкости атмосферы при потеплении повышает риск формирования интенсивных атмосферных вихрей, в том числе мощных циклонов и в тропических, и в средних и в полярных широтах, а также локальных вихрей типа смерчей/торнадо [20]. В связи с интенсификацией конвективных процессов отмечена тенденция роста конвективной облачности, в частности в Северной Евразии, положительные тренды конвективных осадков, повторяемости ливневых осадков [4, 21]. При усилении конвективной активности в атмосфере следует ожидать повышения молниевой активности и, как следствие, риска возникновения лесных пожаров. Получены оценки роста риска образования смерчей в реги-

онах Северной Евразии по современным данным реанализа для последних десятилетий и при возможных изменениях климата в XXI в., рассчитанных с применением ансамбля глобальных климатических моделей. Выявлен рост повторяемости условий, способствующих возникновению смерчей в Северной Евразии. Эта тенденция особенно характерна для Дальнего Востока и региона Чёрного моря. Формированию мощных конвективных процессов с аномальными осадками способствует повышение температуры поверхности моря. Рекордное наводнение на Амуре в 2013 г. было связано в том числе и с необычно высокой температурой поверхности Тихого океана [19].

В результате ослабления меридионального градиента температуры и зональной циркуляции в тропосфере от тропических до средних широт следует ожидать увеличения извилистости атмосферного струйного течения и вероятности меридиональных прорывов в субтропические и средние широты холодного северного воздуха или тёплого из тропиков с формированием соответствующих аномалий температуры и осадков.

Сильнейшие региональные аномалии в средних широтах обусловлены атмосферными блокировками зонального переноса в тропосфере. С ними связаны, в частности, аномально жаркое лето с пожарами в европейской части России летом 2010 г., рекордное наводнение на Амуре в 2013 г., холодные зимы в регионах Северной Евразии и Северной Америки в последние десятилетия [4]. Формирование режимов блокирования с чередованием положительных и отрицательных аномалий давления в атмосфере и температуры в сопредельных регионах проявляется при стационарировании в тропосфере волн Россби, распространяющихся с востока на запад в зональном геострофическом потоке, направленном в средних широтах с запада на восток. Длительные режимы со стационарированием волн Россби и блокировками зонального переноса в тропосфере увеличивают вероятность наводнений и пожаров в сопредельных областях. Летом 2019 г. достаточно резкая граница антициклонического и циклонического режимов в условиях атмосферного блокирования над Сибирью проходила через Иркутскую область. Это привело к наводнению в одной её части (Тулун), которая оказалась в области пониженного давления, и к пожарам в другой — в области повышенного давления.

По спутниковым данным отмечены региональные тенденции увеличения мощности лесных пожаров, в частности в Сибири [22]. При этом для последних двух десятилетий (2001–2019 гг.) выявлена значимая связь площади природных пожаров и вызванных ими эмиссий в атмосферу продуктов горения с блокировками на терри-

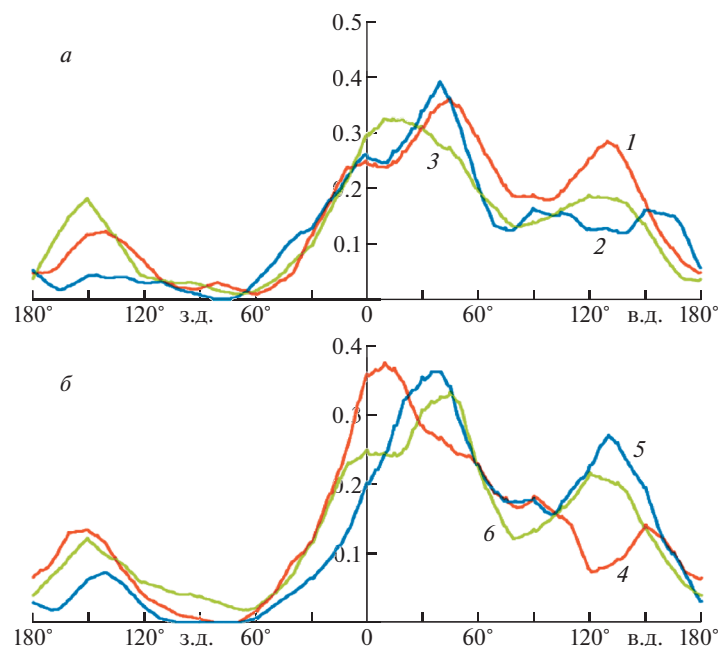


Рис. 6. Повторяемость летних атмосферных блокирований в Северном полушарии в зависимости от долготы, 1969–2013 гг., для лет, начинающихся (а) и заканчивающихся (б) в фазе Эль-Ниньо (1, 4), Ла-Нинья (2, 5) и нейтральной фазе (3, 6)

тории России [23]. Вклад в дисперсию межгодовых изменений площади пожаров и потоков продуктов горения в атмосферу, связанный с атмосферными блокировками, может достигать и даже превышать 40%. Проявляется тенденция увеличения плотности эмиссий продуктов горения в атмосферу, в том числе углекислого и угарного газов, а также мелкодисперсного аэрозоля, на фоне общего уменьшения площадей природных пожаров в первое 20-летие нынешнего века [23].

Согласно модельным оценкам при глобальном потеплении следует ожидать увеличения вероятности более длительных атмосферных блокирований и изменения режимов квазистационарных планетарных волн [24]. При этом ожидается усиление продолжительных блокирований, в том числе зимних, с которыми связаны морозные режимы над континентальными регионами. При изменениях температуры (T) изменяются характерные скорости распространения волн Россби (U_R) и условия их стационарирования $U = U_R$ в поле атмосферного течения (с зональной скоростью U) в зависимости от волнового числа m

$$(dU/dT)/U = -2(dm/dT)/m,$$

при $dU/dT < 0$ следует $dm/dT > 0$. Это означает, что ослабление зонального потока при потеплении способствует стационарированию волн Россби с большим волновым числом и следует ожидать чередования в тропосфере средних широт менее

протяжённых по долготе квазистационарных антициклонических и циклонических аномалий. Усиление блокинговой активности в атмосфере в сочетании с летними тенденциями иссушения во внутриконтинентальных среднеширотных регионах способствует повышению вероятности природных пожаров и их негативных последствий.

Формирование режимов атмосферного блокирования и связанных с ними региональных погодноклиматических аномалий зависит от межгодовых и междесятилетних климатических вариаций, связанных с крупномасштабными процессами типа Эль-Ниньо, Атлантической мультисекулярной осцилляции, Тихоокеанской десятилетней осцилляции [19, 25]. Согласно рисунку 6, повторяемость летних атмосферных блокирований в средних широтах европейской части России заметно больше в годы, начинающиеся в фазе Ла-Нинья (как в 2021 г.) и фазе Эль-Ниньо (как в 2020 г.), по сравнению с начинающимися в нейтральной фазе [19]. При этом повторяемость блокирований в этих регионах заметно выше в годы, заканчивающиеся в фазе Ла-Нинья или нейтральной (эти фазы наиболее вероятны и для конца 2021 г.) [9]. Значительные вариации повторяемости летних атмосферных блокирований в зависимости от фаз явлений Эль-Ниньо проявляются к востоку от Байкала. Причём этот эффект в восточной части Азии существенно заметнее в годы, начинающиеся в фазе Эль-Ниньо, а также в годы, заканчивающиеся в фазе Ла-Нинья или нейтральной фазе. Наибольшая вероятность экс-

тремально высокой приповерхностной температуры и засухи в весенне-летние месяцы в регионах европейской части территории России возникает в годы, начинающиеся в фазе Эль-Ниньо и заканчивающиеся в фазе Ла-Нинья с отрицательными аномалиями температуры в экваториальных широтах Тихого океана [25]. Так было, например, в 2010 г., когда летом на европейской территории России была аномальная жара с сильнейшими пожарами. В то же время для ряда регионов в азиатской части России (без Дальнего Востока) подобные процессы наблюдаются при продолжающейся фазе Эль-Ниньо с начала до конца года (как, например, в 2015 г.). Отмечена значимая связь с явлениями Эль-Ниньо гидрологического режима в бассейне Каспийского моря, в том числе его уровня. Следует отметить, что при глобальном потеплении возможно нарастание региональных эффектов в связи с тенденцией усиления и учащения квазициклических процессов типа Эль-Ниньо.

Рекордное амурское наводнение 2013 г., вызванное интенсивными продолжительными осадками в бассейне Амура, было обусловлено атмосферным блокированием над Тихим океаном в сезон дальневосточного муссона на фоне аномально высокой температуры поверхности океана в отрицательной фазе ТДО [9, 19]. Аномальному наводнению способствовало также повышенное влагосодержание почвы в речном бассейне вследствие увеличения зимнего снегозапаса в дальневосточном регионе. (Тенденция роста зимнего снегозапаса, проявляющаяся на территории России в последние десятилетия, связана с увеличением количества зимних осадков при потеплении.)

Рост ТПО способствует усилению конвективных процессов в атмосфере с усилением риска формирования экстремальных режимов ливневых осадков и наводнений в прибрежных регионах, тропических циклонов и их трансформации во внетропические [4, 9, 19]. Наряду с этим рост температуры морей и океанов способствует формированию так называемых “красных приливов” с вредоносным цветением водорослей в прибрежных зонах, как, например, в 2020 г. у полуострова Камчатка [9].

В связи с необходимостью соответствовать условиям Парижского соглашения (2015 г.) Рамочной конвенции ООН об изменении климата требуется адекватная количественная оценка всех источников эмиссий парниковых газов в атмосферу и их стоков, в том числе адекватный учёт углеродного баланса лесов, наземных и водных экосистем. В российских регионах наземные экосистемы, поглощая CO_2 из атмосферы, способствуют замедлению роста глобальной температуры у поверхности, а эмитируя в атмосферу CH_4 ,

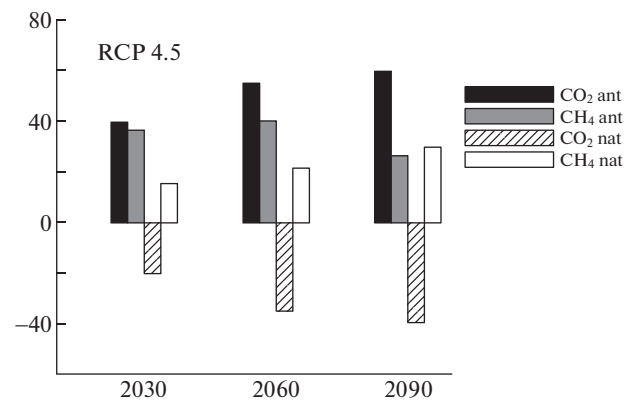


Рис. 7. Абсолютный потенциал (мК) антропогенных (CO_2 ant и CH_4 ant) и естественных (CO_2 nat и CH_4 nat) эмиссий в атмосферу CO_2 и CH_4 с территории России для интервалов 1990–2030 гг., 1990–2060 гг. и 1990–2090 гг. при сценарии RCP4.5

ускоряют потепление. Общий эффект естественных потоков этих парниковых газов из российских регионов в современных условиях способствует замедлению потепления. При этом согласно полученным в работе [26] модельным оценкам роль этого замедляющего потепление эффекта в первой половине XXI в. растёт, а после достижения максимума (зависящего от сценария антропогенных выбросов) к концу века уменьшается при различных анализировавшихся сценариях антропогенных воздействий в связи с ростом естественных эмиссий CH_4 и уменьшением поглощения CO_2 наземными экосистемами (рис. 7).

Необходимо принимать во внимание потенциальные новые риски и возможности. При принятии решений следует учитывать, что в зависимости от горизонта планирования может изменяться роль естественных потоков парниковых газов в атмосферу из наземных экосистем, в том числе стабилизирующий эффект, обусловленный поглощением потоков CO_2 лесами. Необходимы количественные оценки на разных временных горизонтах роли ключевых источников и стоков парниковых газов, связанных с различными естественными экосистемами — от степных до тундровых, а также болотами, озёрами и др.

Особое значение имеют оценки новых рисков и возможностей в Арктике в связи с сильнейшими климатическими изменениями в высоких широтах. При быстром уменьшении протяжённости морских льдов в Арктическом бассейне и увеличении навигационного периода открываются новые перспективы на Северном морском пути. На рисунке 8 приведены мультимодельные прогнозистические оценки для начала и конца навигационного периода на Северном морском пути при сценариях RCP4.5 и RCP8.5 в сопоставлении с оценками, полученными по спутниковым дан-

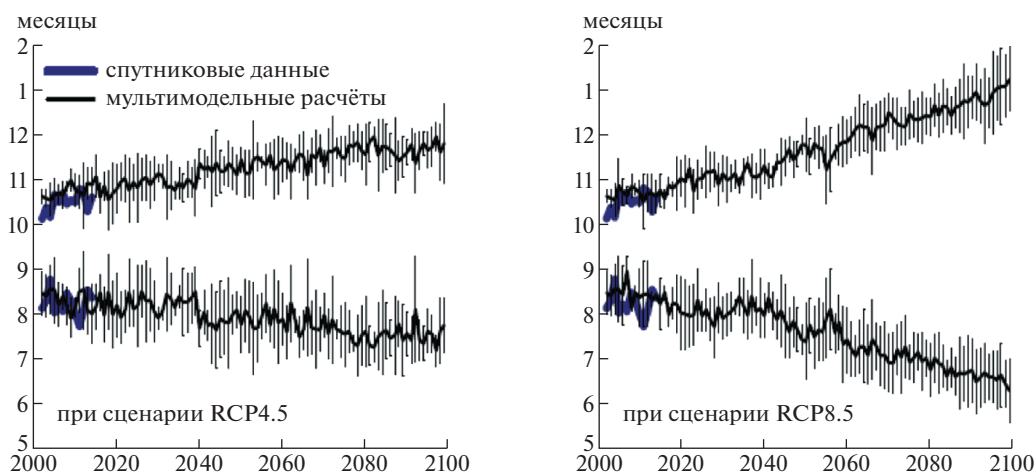


Рис. 8. Мультимодельные прогностические оценки начала и конца навигационного периода на Северном морском пути при сценариях RCP4.5 и RCP8.5 в сопоставлении с оценками, полученными по спутниковым данным. Отмечены также соответствующие стандартные отклонения для ансамбля модельных оценок

ным [27]. При этом усиление морского волнения в арктическом бассейне создаёт новые риски, в том числе для работ на шельфе.

Важное значение имеют оценки эмиссии метана в атмосферу в связи с возможным разложением метангидратов, в том числе на российском арктическом шельфе, при потеплении и таянии вечной мерзлоты. В настоящее время эти оценки, в частности для морей Восточной Арктики, различаются на порядки [28–34]. Следует отметить, что эмиссию метана в атмосферу, отмечаемую по данным наблюдений на арктическом шельфе, можно связать с адаптацией термического режима донных отложений шельфа (с характерным временем порядка 10^4 лет) к режиму потепления в оптимуме голоцена [35, 36]. Согласно модельным оценкам [37–39], дополнительное глобальное потепление при учёте взаимодействия с природным метановым циклом (из-за соответствующей положительной климатической обратной связи) относительно мало на фоне ожидаемых температурных изменений в XXI в. при сценариях антропогенных воздействий.

Климатические аномалии последних лет свидетельствуют не только об увеличении риска экстремальных региональных событий, но и о возникновении новых явлений, характеризующих достижение определённого критического уровня происходящих изменений, в частности в Арктических регионах. Например, в последние годы выявлено образование воронок (кратеров) на Ямале и в сопредельных регионах [40, 41]. В работе [41] их возникновение связывается с разложением метангидратов неглубокого залегания с газовым выбросом в атмосферу в регионах распространения вечной мерзлоты на фоне потепления. Согласно [41] формирование метангидратов не-

глубокого залегания было возможно при высоком давлении под существовавшим в отмеченных регионах десятки тысяч лет назад ледовым щитом. То, что кратеры, подобные ямальским, образуются в настоящее время, свидетельствует о том, что современное потепление климата может быть не только сопоставимо с потеплением оптимума голоцена около 6 тыс. лет назад, но и превосходить его, по крайней мере на региональном уровне [41, 42]. В целом это согласуется с оценками, полученными в работе [43], для голоцена. В работе [41] также оценён риск образования кратеров в североамериканских регионах с вечной мерзлотой. Оценки критического уровня глобального потепления, при превышении которого режим роста антарктического ледового щита за счёт снегонакопления сменяется его деградацией вследствие интенсивного таяния, приводятся в работе [44]. Согласно полученным модельным оценкам, критический уровень, характеризующий качественную смену режима изменения уровня Мирового океана, может быть достигнут уже при глобальном потеплении на 1.6 К, тогда как в решениях Парижской конференции по изменению климата допускается увеличение глобальной приповерхностной температуры не более чем на 2 К. Полученная оценка критического уровня свидетельствует о целесообразности более жёстких ограничений для диапазона допустимых изменений климата (не более 1.5 К), вне которого возможны необратимые процессы.

В Климатической доктрине Российской Федерации (<http://kremlin.ru/events/president/news/6365>), принятой в 2009 г., отмечается: “Изменение климата является одной из важнейших международных проблем XXI века, которая выходит за рамки научной проблемы и представляет собой ком-

плексную междисциплинарную проблему, охватывающую экологические, экономические и социальные аспекты устойчивого развития Российской Федерации. Особенную обеспокоенность вызывает беспрецедентно высокая скорость глобального потепления, наблюдаемая в течение последних десятилетий. Современная наука предоставляет всё более веские основания в подтверждение того, что хозяйственная деятельность человека, связанная прежде всего с выбросами парниковых газов в результате сжигания ископаемого топлива, оказывает заметное влияние на климат”.

Согласно результатам анализа современных изменений климата с использованием модельных оценок с учётом естественных и антропогенных факторов в результате быстрого потепления у поверхности в последние десятилетия земная климатическая система достигла режима, сопоставимого с режимом оптимума голоцена. При этом современные климатические модели способны адекватно воспроизводить не только средние глобальные и региональные режимы и тенденции их изменений, но и особенности их изменчивости, связанные с региональной спецификой [4].

Что касается России, то при продолжении глобального потепления наряду с учётом новых возможностей, включая перспективы использования Северного морского пути, увеличение вегетационного периода роста растений и др., необходимо решать проблемы адаптации и регулирования в связи с негативными последствиями таяния вечной мерзлоты, увеличения риска наводнений, экстремальной жары и засух, лесных пожаров и т.п. [4, 12, 45–48]. В связи с происходящими и ожидаемыми изменениями климата для эффективного решения проблем адаптации к ним и их возможного регулирования необходим кардинальный пересмотр системы критериев оценки новых рисков, негативных последствий и потенциальных выгод. Требуется стратегический подход (не только на одно-два десятилетия), развитие общей системы взаимно согласованных региональных оценок предсказуемости сезонных климатических аномалий в межгодовой и десятилетней изменчивости.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

В статье использовались результаты, полученные в рамках программы Президиума РАН “Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования” и по проекту РНФ (19-17-00240).

ЛИТЕРАТУРА

1. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental

- Panel on Climate Change / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge—New York: Cambridge University Press, 2013.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их влиянии на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014.
3. Грива Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ—МЦД, 2012.
4. Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. № 4. С. 1–21.
5. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Вклад радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультисексуальной осцилляции в тренды приповерхностной температуры // Метеорология и гидрология. 2018. № 9. С. 5–13.
6. Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Денисов С.Н. и др. Фазовый сдвиг между изменениями глобальной температуры и содержания CO₂ в атмосфере при внешних эмиссиях парниковых газов в атмосферу // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. № 3. С. 11–19.
7. Ganopolski A., Winkelmann R., Schellnhuber H.J. Critical insolation – CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception // Nature. 2016. V. 529. P. 200–204.
8. Cheng L., Abraham J., Jiang Zhu J. et al. Record-setting ocean warmth continued in 2019 // Adv. Atmos. Sci. 2020. V. 37. P. 137–142.
9. Мохов И.И. Экстремальные атмосферные и гидрологические явления в российских регионах: связь с тихоокеанской десятилетней осцилляцией // Доклады АН. Науки о Земле. 2021. № 2. С. 73–78.
10. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург: Росгидромет, 2017.
11. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I. et al. Arctic sea ice cover in connection with climate change // Izvestiya Atmos. Oceanic Phys. 2015. № 9. P. 889–902.
12. Мохов И.И. Современные изменения климата Арктики // Вестник РАН. 2015. № 5–6. С. 478–484.
13. Мохов И.И., Парфёнова М.Р. Связь протяжённости антарктических и арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979–2020 гг. // Доклады АН. Науки о Земле. 2021. № 1. С. 71–77.
14. Мохов И.И., Акперов М.Г. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. № 4. С. 467–475.
15. Мохов И.И., Семёнов А.И., Володин Е.М., Дембицкая М.А. Изменения выхолаживания в области мезопазузы при глобальном потеплении по данным измерений и модельным расчётам // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. № 4. С. 435–444.
16. Мохов И.И. О влиянии CO₂ на термический режим земной климатической системы // Метеорология и гидрология. 1981. № 4. С. 24–34.
17. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008.

18. Мохов И.И., Семёнов В.А., Хон В.Ч. Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2003. № 2. С. 150–165.
19. Мохов И.И., Хон В.Ч., Тимажеев А.В. и др. Гидрологические аномалии и тенденции изменения в бассейне реки Амур в связи с климатическими изменениями // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. М.: Росгидромет, 2014. С. 81–120.
20. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика / Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. М.: ГЕОС, 2018.
21. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O. et al. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. P. 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>
22. Ситнов С.А., Мохов И.И. Сравнительный анализ характеристик пожаров в бореальных лесах Евразии и Северной Америки по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2018. № 2. С. 21–37.
23. Мохов И.И., Бондур В.Г., Ситнов С.А., Воронова О.С. Космический мониторинг природных пожаров и эмиссий в атмосферу продуктов горения на территории России: связь с атмосферными блокировками // Доклады АН. Науки о Земле. 2020. № 2. С. 61–66.
24. Мохов И.И., Тимажеев А.В. Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчётам с ансамблем климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 5–16.
25. Мохов И.И., Тимажеев А.В. Оценки риска погодноклиматических аномалий в российских регионах в связи с явлениями Эль-Ниньо // Метеорология и гидрология. 2017. № 10. С. 22–33.
26. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO₂ и CH₄ в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Доклады АН. 2019. № 1. С. 595–601.
27. Khon V.C., Mokhov I.I., Semenov V.A. Transit navigation through Northern Sea Route from satellite data and CMIP5 simulations // Environ. Res. Lett. 2017. V. 12 (2). 024010.
28. Archer D. Fate of fossil-fuel CO₂ in geologic time // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. C09S05.
29. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // Nature Geosci. 2014. V. 7. P. 64–70.
30. Berchet A., Bousquet P., Pison I. et al. Atmospheric constraints on the methane emissions from the East Siberian Shelf // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16 (6). P. 4147–4157.
31. Thornton B.F., Geibel M.C., Crill P.M. et al. Methane fluxes from the sea to the atmosphere across the Siberian shelf seas // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 5869–5877.
32. Wählström I., Dieterich C., Pemberton P., Meier H.E.M. Impact of increasing inflow of warm Atlantic water on the sea-air exchange of carbon dioxide and methane in the Laptev Sea // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2016. V. 121. P. 1867–1883.
33. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost–hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf // Geosciences. 2019. V. 9. P. 251.
34. Malakhova V.V. The response of the Arctic Ocean gas hydrate associated with subsea permafrost to natural and anthropogenic climate changes // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 606. P. 012035.
35. Romanovskii N.N., Hubberten H.W., Gavrilov A.V. et al. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // Geo-Mar. Lett. 2005. V. 25. P. 167–182.
36. Malakhova V.V., Eliseev A.V. The role of heat transfer time scale in the evolution of the subsea permafrost and associated methane hydrates stability zone during glacial cycles // Glob. Planet. Change. 2017. V. 157. P. 18–25.
37. Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др. Учёт взаимодействия метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. № 2. С. 147–162.
38. Володин Е.М. Цикл метана в модели климата ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. № 2. С. 163–170.
39. Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С. и др. Математическое моделирование Земной системы / Под ред. Н.Г. Яковлева. М.: МАКС Пресс, 2016.
40. Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О. и др. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. № 2. С. 15–25.
41. Аржанов М.М., Мохов И.И. Оценки степени устойчивости континентальных реликтовых метангидратов в оптимуме голоцена и при современных климатических условиях // ДАН. 2017. № 4. С. 456–460.
42. Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // Доклады АН. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 27–32.
43. Marcott S.A., Shakun J.D., Clark P.U., Mix A.C. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11300 years // Science. 2013. V. 339. P. 1198–1201.
44. Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. № 5. С. 624–640.
45. Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Хандошко Л.А. и др. Основы оптимальной адаптации экономики России к опасным проявлениям погоды и климата // Метеорология и гидрология. 2009. № 4. С. 5–14.
46. Исследование возможностей стабилизации климата с помощью новых технологий. М.: Росгидромет, 2012.
47. Оганесян В.В., Стерин А.М. Расчёт потенциального финансового ущерба от опасных и неблагоприятных метеорологических явлений на территории Российской Федерации в 1987–2017 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 12. С. 97–108.
48. Порфирьев Б.Н. Экономическое измерение климатического вызова устойчивому развитию России // Вестник РАН. 2019. № 4. С. 400–407.

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2022 г. А. А. Ярославов^{a,*}, М. С. Аржаков^{a,**}, А. Р. Хохлов^{a,b,***}

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^bИнститут элементоорганических соединений имени А.Н. Несмеянова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: yaroslav@belozersky.msu.ru

**E-mail: msa60@yandex.ru

***E-mail: khokhlov@presidium.ras.ru

Поступила в редакцию 05.07.2021 г.

После доработки 19.07.2021 г.

Принята к публикации 26.07.2021 г.

Полимерные материалы рассчитаны на ограниченный срок эксплуатации, в связи с чем всё более актуальной становится проблема минимизации полимерных отходов, а также их последующей утилизации. Минимизация полимерных отходов может быть осуществлена либо за счёт их вторичной переработки (что требует их раздельного сбора и сортировки), либо за счёт развития безотходных технологий замкнутого цикла. Конечная утилизация полимерного материала происходит при захоронении в почву на свалке, а также при сжигании на мусоросжигательном заводе. В статье рассматриваются основные научные проблемы, которые связаны с оптимальным планированием всех стадий жизненного цикла полимерного материала — его производства, эксплуатации и утилизации.

Ключевые слова: полимерные материалы, пластик, производство, безотходные технологии, вторичная переработка, утилизация.

DOI: 10.31857/S086958732201011X

100 лет назад в Германии была опубликована статья, в которой впервые была изложена теория о цепном строении “больших” молекул [1]. Автор этой теории Герман Штаудингер показал, что в таких молекулах, названных им макромолекулами, отдельные элементы (звенья) соединены друг с другом в длинные цепи, существование которых определяет необычные и, как оказалось, практи-

чески важные свойства новых “полимерных” материалов. Результатом этого открытия стало понимание того, как можно получить прочные, лёгкие и недорогие материалы с контролируемыми свойствами, которые нашли применение в разных областях — от упаковки и одежды до авто- и авиастроения.



ЯРОСЛАВОВ Александр Анатольевич — член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. АРЖАКОВ Максим Сергеевич — доктор химических наук, профессор кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. ХОХЛОВ Алексей Ремович — академик РАН, вице-президент РАН, заведующий кафедрой физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, заведующий лабораторией физической химии полимеров ИНЭОС РАН.

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ



Рис. 1. Жизненный цикл полимерного материала

За 100 лет развития науки о полимерах и полимерной промышленности мир окружающих человека материалов изменился до неузнаваемости. Одновременно полимерный прогресс привёл к появлению новых проблем, главная из которых связана с ограниченным сроком использования полимерных материалов. Традиционные материалы, с которыми имеет дело человек, — керамика, стекло, металл, древесина — используются в течение длительного времени. В отличие от них полимерные материалы часто рассчитаны на более короткий срок эксплуатации, а полимерная упаковка — на одноразовое употребление [2, 3].

Устойчивость полимеров к действию атмосферных факторов (тепло, свет, влажность и проч.) и микроорганизмов привела к накоплению использованных и ставших ненужными полимерных материалов и изделий [4, 5]. Скопления полимерного мусора обнаруживаются практически повсеместно. Стихийные свалки формируются в пригородных и рекреационных зонах, лесах, прибрежной полосе, на морском побережье и т.д. Оттуда мусор смывается дождями и тальми водами в реки и затем в моря и океаны, формируя гигантские мусорные острова [6]. Неприятным следствием этого длительного путешествия пластика является постепенное измельчение полимерного материала до дисперсных частиц (микропластика) [7], которые наносят катастрофический вред поедающим их живым организмам (животным, птицам и рыбам) и которые по пищевым цепям попадают в организм человека. Свой вклад в разрастание мусорных островов и появление микропластика вносит рыболовный промысел с его традиционной практикой оставлять в океане потерянные рыболовные сети.

В 2019 г. в мире было произведено около 368 млн тонн пластика [8], всего же с 1950 по 2017 г. — около 6.3 млрд тонн [9], из них переработано около 9% и сожжено 12%. Остальной мусор либо пополнил объёмы стихийных свалок, либо находится на контролируемых полигонах, либо увеличил размеры мусорных островов. Эти факты заставляют обратить самое серьёзное внимание на проблему очистки планеты от накопившегося мусора (в том числе полимерного) и на разработку способов минимизации распространения мусора [10].

Существующий рынок полимерной продукции представлен ограниченным набором исходных полимеров; для улучшения экономических и потребительских характеристик конечного продукта часто используют комбинации полимеров. В Евросоюзе только четыре вида полимеров — полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид и полиэтилентерефталат — формируют три четверти полимерного рынка [11]; суммарно продукция европейских компаний достигает 17% мирового рынка полимеров. Крупнейший производитель полимерной продукции — Китай, который занимает 30% мирового рынка; две трети выпускаемых и потребляемых полимеров относятся к числу крупнотоннажных (полиэтилен, полипропилен и др). Российский рынок изделий из пластика составляет немногим более 2% мирового объёма; около 15% всех промышленных изделий в России изготовлены из пластмассы.

Основные стадии жизненного цикла полимеров включают (рис. 1):

- *производство*, то есть синтез и переработку полимерного сырья в материал и изделие;

- *эксплуатацию*, в ходе которой происходит старение и износ материала/изделия с потерей первичного комплекса свойств;

- *утилизацию*, под которой понимают вторичную переработку полимерных отходов и/или уничтожение полимерного материала/изделия.

Производство. С одной стороны, перед производителями ставится задача повысить качество исходного сырья (сортированных полимерных отходов) для переработки во вторичные полимеры. Это требует развития оптимизированного дизайна, который должен обеспечить технологическую реализуемость и экономическую привлекательность рециклинга. В первую очередь это касается упаковки, на долю которой приходится по разным оценкам от 30 до 50% выпускаемых полимеров [12]. С другой стороны, полимерные изделия часто содержат различные трудноудаляемые добавки (красители, стабилизаторы, пластификаторы, модификаторы и проч.), которые ухудшают качество вторичного сырья, что осложняет его переработку и повышает её стоимость. Стратегия оптимизированного дизайна предполагает (а) снижение до возможного минимума добавок, прежде всего токсичных, (б) использование полимеров одного вида или смесей, которые могут быть разделены на отдельные компоненты, (в) лёгкую идентификацию полимеров в смесях и композитах.

Параллельно следует оказывать поддержку исследованиям в сфере поиска, во-первых, новых полимеров и полимерных материалов, во-вторых, новых направлений использования известных полимеров, которые позволят расширить области их применения без существенного изменения технологии синтеза/формования. Особый интерес вызывают *безотходные технологии* замкнутого цикла, реализуемые без органических растворителей и дающие на выходе 100%-ный полимер или готовое сформованное изделие, и технологии, позволяющие получать продукты через дозированное *смешивание водных полимерных растворов*. Пример безотходной технологии — использование лабильных, реакционноспособных и стимул-чувствительных прекурсоров (смесей полимер—мономер—инициатор) [13]. Мономер в прекурсор (а) облегчает переработку композиции, что в традиционном варианте достигается введением пластификаторов, лабрикантов и т.п., (б) обеспечивает направленное формирование структуры материала и (в) фиксирует сформованную структуру и конфигурацию изделия за счёт дополимеризации и полного исчерпания мономера.

Ещё один пример безотходной технологии — 3D-печать, или аддитивное производство [14, 15]. Под этим термином понимают создание трёхмерных объектов путём последовательного нанесе-

ния слоёв жидкого, порошкообразного или листового материала, в качестве которого часто используют термо- и фоточувствительные полимеры (полимерные смеси). Фиксация формы готового изделия достигается отверждением расплавленного полимера или в ходе полимеризации жидкой смеси с участием фотоактивных компонентов. В отличие от традиционных методов механического производства и обработки (фрезеровка, резка, сверление и проч.) 3D-печать исключает стадии удаления лишнего материала. К растворной технологии относится получение поликомплексных рецептур из водорастворимых комплементарных полимеров, например, из противоположно заряженных полимеров (полиэлектролитов) [16]. Растворитель (вода) легко удаляется из полимерного раствора при испарении, когда поликомплексная рецептура используется в качестве связующего сыпучих тел (в том числе почв и грунтов) [17] и материала для аддитивных технологий [18] или совместима с биологической средой, в которой функционирует поликомплексный носитель лекарственных веществ [19]. Описанные подходы позволяют заметно расширить спектр продукции с использованием ограниченного круга исходных полимеров и/или мономеров, при этом сократив количество или даже полностью исключив вспомогательные вещества. Этот путь — минимальный набор исходных веществ, их экологическая совместимость и безотходность производственного процесса — представляется самым перспективным при обсуждении возможностей совершенствования технологии синтеза полимеров будущего.

Эксплуатация. В процессе эксплуатации полимеры (полимерные материалы) подвергаются различным воздействиям (деструкции, химической модификации, загрязнению, механическому износу и проч.), которые могут существенно изменить свойства полимеров/материалов. Такая “модификация” может сделать вторичное полимерное сырьё непригодным для производства некоторых изделий (например, медицинского/гигиенического назначения или контактирующих с пищей) и закрыть целые области для использования переработанного вторичного сырья.

Особую опасность представляет деструкция полимеров до частиц размером менее 5 мм (микропластик), которые могут встраиваться в пищевые цепочки и наносить ущерб живой природе [20]. Такие частицы формируются при истирании автомобильных шин, дорожного покрытия и краски, стирке синтетической одежды и при производстве полимеров (так называемый первичный микропластик). Крупный пластиковый мусор (пакеты, одноразовая посуда, бутылки, упаковочная плёнка и др.) распадается до вторичного микропластика под действием природных сил. По оценкам Международного союза охраны



Рис. 2. Большое тихоокеанское мусорное пятно: вид сверху (слева) и снизу (справа)

природы (International Union for Conservation of Nature, IUCN), вторичных микропластиков в 5–6 раз больше, чем первичных.

Первичный микропластик и крупные пластиковые объекты дождями смываются в реки, которые выносят мусор в океаны. В отчёте Еврокомиссии (2019) [21] указывается, что ежегодно в океан попадает от 4.8 до 12.7 млн тонн пластиковых отходов; 50% этой массы приходится всего на пять стран: Китай, Индонезию, Филиппины, Вьетнам и Шри-Ланку.

Попавший в океан мусор собирается в крупные острова, в которых удерживается поверхностными океаническими течениями. На самом деле остров больше похож на “пластиковый суп” с весовой долей мелких частиц (микропластика) около 8% и количеством таких частиц, превышающим 90% [6] (рис. 2). Самое крупное из таких образований известно как Большое тихоокеанское мусорное пятно, или Восточный мусорный континент (северная часть Тихого океана). Термин был предложен океанографом Кертисом Эббесмейером. Пятно представляет собой мобильную систему, в которой некоторые части могут отделяться, снова соединяться или уходить на глубину (до сотен метров); в придонные слои опускается до 70% попадающего в океан пластика. Размеры и внешний вид пятна постоянно меняются. Точный размер мусорного континента неизвестен, по приблизительной оценке это от 700 тыс. до 1.5 млн км² [22]. При таких масштабах пятно может содержать более 100 млн тонн мусора, состоящего в основном из мелких частиц первичного и вторичного (то есть мелкого) пластика; по некоторым оценкам, содержание мусора здесь в несколько раз больше — до 350 млн тонн отходов.

Считается, что основная часть мусора попадает в океан из наземных источников, остальное — последствия работы нефтяных буровых установок и судоходства (рыболовные сети, мусор с судов, грузовые контейнеры и др.). Этот результат

ставит вопрос об экологической ответственности человека за последствия неразумного (потребительского) отношения к использованию полимерных материалов и изделий. Необходимо повышать информированность людей о последствиях полимерного загрязнения, сделать постоянной и системной очистку рекреационных/прибрежных зон и пляжей от мусора, отказаться от использования одноразового пластика, заменить синтетический пластик на биodeградируемый (в том числе природного происхождения).

Утилизация. Для утилизации полимеров предлагаются три основных подхода: вторичная переработка полимеров в новые продукты, использование полимеров в виде топлива для получения энергии, а также биологическое разложение полимеров под воздействием естественных причин.

Вторичная переработка пластика означает возможность многократного использования произведённых полимерных материалов. Для этого необходимо организовать отдельный сбор полимерного мусора и последующую сортировку пластиковых отходов по химическому составу полимера, целевому назначению, цветовой гамме и т.д. Для упрощения этих процедур предлагается снабжать полимерные материалы поясняющими надписями, специальными химическими маркерами (трейсерами) и водяными знаками. В дополнение к этому следует повышать ответственность производителя за жизненный цикл товара, требуя от него организации и проведения процедур сбора и сортировки мусора или выплаты компенсации в случае отказа.

Следует иметь в виду, что по своим характеристикам вторичный пластик уступает исходному из-за износа и старения в процессе эксплуатации, а также вследствие повторного температурно-силового воздействия в ходе вторичной переработки. Эти факторы значительно сужают области целевого использования переработанного пластика. Дополнительная проблема — вторичная переработка модифицированных полимеров. Модифи-

кация заметно усложняет переработку полимеров; кроме того, свойства получаемых продуктов могут сильно зависеть от состава и качества вторсырья. Необходимость проведения тщательной очистки мусорного композиционного или смешанного пластика увеличивает себестоимость материала и делает его рециклинг нерентабельным.

Для одноразовых изделий следует использовать полимеры, дающие вторичное сырьё с высоким потенциалом повторного использования. Именно по этой причине Евросоюз отказался от использования вспененного полистирола для производства одноразовой посуды [23]: малый вес и склонность к быстрому и неустраняемому загрязнению делают нерентабельной вторичную переработку изделий из этого полимера.

Отметим, что даже в самом благоприятном случае вторичная переработка не решает, а только отсрочивает проблему утилизации отходов. Причём этот вопрос практически не рассматривается в публикациях на тему рециклинга. Между тем очевидно, что многократная переработка полимерного мусора должна сопровождаться потерей всех его функциональных и эксплуатационных свойств. В итоге через несколько циклов переработки оставшаяся масса будет непригодна для превращения в новый продукт и может быть только уничтожена (сожжена или захоронена).

Возможный вариант вторичной переработки полимерных отходов связан с получением из них широко используемых химических веществ, таких как ацетон, уксусная кислота и т.д. [24]. Этот путь требует тщательной сортировки пластиковых отходов с целью получения однородного по составу продукта для дальнейшего термоллиза и разработки специфических катализаторов для повышения выхода целевых продуктов. Перспективной средой для проведения таких процессов является типичный растворитель “зелёной химии” — сверхкритический диоксид углерода [25]. Использование пиролитического способа разложения полимеров (в инертной атмосфере) позволяет получать до 90% продукта, который можно применять в качестве жидкого топлива (например, в котельных). Пиролитическое разложение позволяет получать бензин, однако такие разработки пока находятся на стадии лабораторных и пилотных испытаний.

Жизненный цикл пластика завершается уничтожением отходов полимерной индустрии путём их сжигания или захоронения в почву [26]. Сжигание полимерного мусора представляется экономически целесообразным процессом, так как полимеры являются высокоэффективным и высококалорийным топливом. Их теплотворная способность чрезвычайно высока. Сгорают они так же чисто, как большинство сортов нефти, и намного чище, чем уголь. Однако использование

полимеров в качестве топлива для получения энергии сталкивается с проблемой нейтрализации токсичных веществ, образующихся в ходе температурной переработки пластиков. В настоящее время проблема выброса продуктов горения в атмосферу решается за счёт применения эффективных катализаторов сгорания/конверсии, фильтров и очистных блоков. В последнее время мусоросжигательные заводы строятся на территориях, отведённых для сбора твёрдых бытовых отходов (мусорных свалках). Эти меры значительно повышают экологическую безопасность экономически выгодного сжигания полимерного мусора. Вопрос об утилизации зольных остатков, содержащих металлы (в том числе тяжёлые) и негорючие минеральные наполнители, остаётся открытым. Использование их в качестве строительного материала, пигментов и т.п. ограничено неконтролируемой и однообразной цветовой гаммой.

Полимеры и полимерные материалы, которые не могут быть превращены в новые продукты и переработаны термически, вывозятся на полигоны для твёрдых бытовых отходов, где происходит их захоронение. Такой полигон, на котором собираются различные, не только полимерные отходы, рассматривается либо в качестве пассивной свалки, которая постепенно проседает из-за уплотнения массы, вызываемой атмосферными воздействиями: дождями, таянием снега, ветром и тяжёлой техникой, привозящий новые партии мусора и разравнивающей свалку. Более эффективный и практически полезный случай — активная свалка, когда мусорный полигон выполняет роль источника так называемого свалочного газа (биогаза), который образуется в результате анаэробного разложения органических, в том числе полимерных, отходов [27]. В любом случае жизненный цикл свалки завершается через 20–25 лет, после чего она подвергается рекультивации с последующим переводом территории в категорию сельскохозяйственных, лесохозяйственных или рекреационных земель.

Работы по рекультивации свалок включают несколько принципиально важных операций: нанесение на поверхность свалки плодородного почвенного слоя и его закрепление с целью противодействия ветровой и водной эрозии; придание слою способности запасать и удерживать воду; нейтрализацию токсичных органических веществ и тяжёлых металлов, отрицательно воздействующих на рост и развитие растений; повышение плодородия почвенного слоя. Весь комплекс этих работ выполняется с использованием водных рецептур на основе поликомплексов [17]. Варьированием состава поликомплексов можно создавать рецептуры, настроенные на обработку почвы определённого вида: песок, супесь, чернозём и т.д.

Изменить ситуацию с загрязнением окружающей среды планировалось за счёт широкого использования полимеров/материалов, способных спонтанно разлагаться под действием простых природных факторов. Однако на смену первоначальному энтузиазму пришли более осторожные оценки. Оказалось, что биоразложение протекает достаточно медленно даже в активных средах, например, в почве [28]. Формирование конъюгатов из биоразлагаемого и небiorазлагаемого полимеров ускоряет деструкцию образца, но отрицательно сказывается на его свойствах, ухудшает способность вторичных полимеров к переработке, снижает качество получаемых изделий и при этом не решает проблему образования опасного микропластика. Помимо этого, термин “биodeградация” часто используют как маркетинговый ход, не имеющий отношения к продаваемому товару, но порождающий у потребителя иллюзию возможности быстрого и безболезненного поглощения полимера природной средой (в предельном случае при выбрасывании полимерного мусора на улицу). Эти критические замечания справедливы прежде всего относительно синтетических биоразлагаемых полимеров/конъюгатов. Природное сырьё (древесина, трава, экзоскелеты ракообразных и насекомых и т.д.) и выделяемые из них полимерные продукты (прежде всего полисахариды различного состава) подвергаются полному биологическому разложению [29] и потому могут быть использованы для получения экологически безопасных материалов и изделий (одно-разовой посуды, упаковки, предметов гигиены).

Отдельного внимания заслуживает проблема мусорных островов/континентов. Катастрофический рост этих образований за последние два десятилетия заставляет искать экономически приемлемые способы переработки океанского мусора. Сейчас обсуждаются разные способы решения этой проблемы (захватывающие платформы, плавучие ограждения, сети для ловли мусора и др.). Однако пока все предложения находятся на стадии тестирования и модернизации; основная причина — низкая эффективность извлечения микропластика, который является существенным компонентом мусорных островов, и связанная с этим экономическая несостоятельность проектов.

В России ситуация с переработкой мусорных отходов выглядит хуже, чем в большинстве промышленно развитых стран. Ежегодно у нас образуется около 70 млн тонн твёрдых коммунальных отходов, каждый год даёт прибавку в 1–2% (по другим данным — до 3%). Из этого количества на долю пластиковых отходов приходится от 3.5 до 5 млн тонн. Перерабатывается лишь малая часть этой массы — не более 7%, остальной мусор вывозится на лицензированные полигоны и стихийные свалки [30]. Такая практика продолжается в

течение десятилетий. Причина нерационального использования мусорных отходов (складирование вместо вторичной переработки в новые продукты) кроется прежде всего в отсутствии в России развитой индустрии переработки бытовых отходов, включая вышедший из употребления пластик. Слабо представлена сортировка отходов. В перерабатываемое вторсырьё превращается лишь 30% образующейся макулатуры и от 10 до 20% полимерных отходов [31]. Такая ситуация вынуждает переработчиков вторсырья увеличивать импорт пластиковых отходов для поддержания существующих мощностей.

Неразвитость российского рынка глубокой переработки бытовых отходов и лавинообразный рост ежегодно собираемого мусора (в том числе полимерного) побуждает обратить внимание на самый простой способ утилизации мусора — его сжигание для получения энергии. В настоящее время в России мусоросжигательных заводов меньше десятка (для сравнения, во Франции больше сотни заводов такого профиля). Две отечественные госкорпорации — Ростех и Росатом — и Внешэкономбанк России заключили соглашение о строительстве 25 заводов по сжиганию отсортированного мусора для его переработки в электроэнергию. В настоящее время дочернее предприятие Ростеха уже строит пять мусоросжигательных заводов в Казани и Подмосковье. Успешный опыт строительства и эксплуатации таких заводов может дать толчок развитию этого направления утилизации мусора.

Параллельно идёт работа по созданию индустрии глубокой переработки мусорных отходов. Национальный проект “Экология” предусматривает [32], что к 2024 г. должно перерабатываться 36% отходов, с этой целью должна быть выстроена система раздельного сбора мусора в масштабах страны и построены заводы по его переработке общей мощностью 37 млн тонн. Хороший ориентир здесь — опыт переработки мусора в Европе [33], где лидирующие позиции занимает Швеция. В этой стране перерабатывают до 80% отходов, 18% сжигают и только 2% увозят на полигоны. В основе этого успеха лежит реализованный жителями страны подход, согласно которому мусор просто не должен образовываться, его нужно уничтожать по мере появления.

С научной точки зрения методы противодействия загрязнению окружающей среды полимерными отходами стали интенсивно изучаться лишь в последнее время. Рост объёмов производства полимеров и ограниченный срок их эксплуатации делает крайне актуальной разработку оптимальных подходов к утилизации полимерного мусора.

Накопление полимерных отходов может быть отсрочено за счёт вторичной их переработки. Однако это требует отдельного сбора и сортировки полимерных отходов, что возможно не всегда. Свойства переработанного продукта часто далеки от свойств исходного полимера по причине изменения (часто необратимого) структуры полимерных материалов в ходе эксплуатации. В связи с этим представляется перспективным развитие безотходных технологий замкнутого цикла, реализуемых без использования органических расщепителей.

В конечном итоге полимерные отходы завершают свой жизненный цикл либо при захоронении в почву на свалке, либо в ходе сжигания на мусоросжигательном заводе. Проблема деградации полимеров после захоронения в почву может быть частично решена путём отказа от некоторых полимеров, замены традиционных полимеров на биоразлагаемые, а также за счёт перехода на выпуск композитов/смесей с участием биоразлагаемых полимеров. Однако это не решает всех проблем, особенно с учётом неизбежного образования микропластика в ходе разложения полимерных отходов. Важный аспект обсуждаемой проблемы – грамотная рекультивация свалок с созданием поверх них плодородного почвенного слоя. Универсальным, хотя и не всегда оптимальным с экономической точки зрения методом утилизации полимеров является их сжигание с целью получения энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Shtaudinger H.* Über Polymerisation // *Europ. J. Inorg. Chem.* 1920. № 53. P. 1073–1085.
2. *Dear J.P., Mason N.S.* Lifetime of polymer pipes in water distribution systems // *L.G. Mallinson (ed.). Ageing studies and lifetime extension of materials.* Boston, MA: Springer, 2001.
3. *Schyns Z.O.G., Shaver M.P.* Mechanical recycling of packaging plastics: a review // *Macromol. Rapid Commun.* 2021. № 42. P. 2000415.
4. *Okan M., Aydin H.M., Barsbay M.* Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2019. № 94. P. 8–21.
5. *Ali S.S., Elsamahy T., Koutra E. et al.* Degradation of conventional plastic wasting the environment: a review on current status of knowledge and future perspectives of disposal // *Sci. Total Environ.* 2021. № 771. P. 144719.
6. *Lebreton L., Slat B., Ferrari F. et al.* Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic // *Sci. Rep.* 2018. № 8. P. 4666.
7. *Akdogan Z., Guven B.* Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs // *Env. Pol.* 2019. № 254A. P. 113011.
8. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>
9. *Mazhandu Z.S., Muzenda E., Mamvura T.A. et al.* Integrated and consolidated review of plastic waste management and bio-based biodegradable plastics: Challenges and opportunities // *Sustainability.* 2020. № 12. P. 8360.
10. *Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L.* Production, use, and fate of all plastics ever made // *Sci. Adv.* 2017. № 3. P. 1700782.
11. *Matthews C., Moran F., Jaiswal A.K.* A review on European Union's strategy for plastics in a circular economy and its impact on food safety // *J. Clean Prod.* 2021. № 283. P. 125263.
12. *Chen Y., Zhang Y., Zhang Z.* Occurrence, effects, and biodegradation of plastic additives in sludge anaerobic digestion: a review // *Env. Poll.* 2021. № 287. P. 117568.
13. *Arzhakov M.* Relaxation in physical and mechanical behavior of polymers. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019.
14. *Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G. et al.* Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges // *Composites Part B.* 2018. № 143. P. 172–196.
15. *El-Sayegh S., Romdhane L., Manjikian S.* A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks // *Archiv. Civ. Mech. Eng.* 2020. № 20. P. 34.
16. *Kabanov V.A.* Polyelectrolyte complexes in solution and in bulk // *Russian Chem. Reviews.* 2005. № 74. P. 3–20.
17. *Zein A.B., Mikheikin S.V., Rogacheva V.B. et al.* Polymeric stabilizers for protection of soil and ground against wind and water erosion // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2015. № 226A. P. 17–23.
18. *Xiang Y., Lu S., Jiang S.P. et al.* Layer-by-layer self-assembly in the development of electrochemical energy conversion and storage devices from fuel cells to supercapacitors // *Chem. Soc. Rev.* 2012. № 41. P. 7291–7321.
19. *García M.C., Eberhardt N., Sanmarco L.M. et al.* Improved efficacy and safety of low doses of benzimidazole-loaded multiparticulate delivery systems in experimental Chagas disease therapy // *Eur. J. Pharm. Sci.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2021.105912>
20. *Xu C., Zhang B., Gu C. et al.* Are we underestimating the sources of microplastic pollution in terrestrial environment? // *J. Hazard. Mater.* 2020. № 400. P. 123228.
21. https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/index_en.htm
22. *Di Bartolo A., Infurna G., Dintcheva N.T.* A review of bioplastics and their adoption in the circular economy // *Polymers.* 2021. № 13. P. 1229.
23. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>
24. *Kosloski-Oh S.C., Wood Z.A., Manjarrez Y. et al.* Catalytic methods for chemical recycling or upcycling of commercial polymers // *Mater. Horiz.* 2021. № 8. P. 1084–1129.
25. *Elmanovich I.V., Stakhanov A.I., Zefirov V.V. et al.* Thermal oxidation of polypropylene catalysed by manganese oxide aerogel in oxygen-enriched supercritical carbon dioxide // *J. Supercritical Fluids.* 2020. № 158. P. 104744.

26. Jain P., Powell J.T., Smith J.L. *et al.* Life-cycle inventory and impact evaluation of mining municipal solid waste landfills // *Environ. Sci. Technol.* 2014. № 48. P. 2920–2927.
27. Meng F., McKechnie J. Challenges in quantifying greenhouse gas impacts of waste-based biofuels in EU and US biofuel policies: Case study of butanol and ethanol production from municipal solid waste // *Env. Sci. Tech.* 2019. № 53. P. 12141–12149.
28. Fojt J., David J., Prikryl R. *et al.* A critical review of the overlooked challenge of determining micro-bioplastics in soil // *Sci. Total Environ.* 2020. № 745. P. 140975.
29. Xu C., Nasrollahzadeh M., Selva M. *et al.* Waste-to-wealth: biowaste valorization into valuable bio(nano)materials // *Chem. Soc. Rev.* 2019. № 48. P. 4791–4822.
30. Говорушко С., Лазарев С., Петухов В., Зелинская Е. Обращение с твёрдыми коммунальными отходами: Россия на фоне мира // *Астраханский вестник экологического образования.* 2021. № 2. P. 4–31.
31. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 января 2018 г. № 84-р.
32. Паспорт Национального проекта “Экология”. https://www.mnr.gov.ru/activity/directions/natsionalnyy_proekt_ekologiya/
33. Milios L., Davani A.E., Yu Y. Sustainability impact assessment of increased plastic recycling and future pathways of plastic waste management in Sweden // *Recycling* 2018. № 3. P. 33.

МЕХАНИКА. 100 ЛЕТ БЕЗ Н.Е. ЖУКОВСКОГО

© 2022 г. А. Н. Богданов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: bogdanov@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 02.04.2020 г.

После доработки 09.04.2021 г.

Принята к публикации 31.07.2021 г.

В статье исследуются и осмысливаются научное наследие и личность Н.Е. Жуковского (1847–1921) — учёного-механика, основоположника гидро- и аэродинамики, заслуженного профессора Московского университета, Императорского Московского технического училища, члена-корреспондента Императорской академии наук. Анализируются основные работы в области механики за прошедшее после его кончины столетие.

Ключевые слова: Н.Е. Жуковский, классики науки, фундаментальные науки, юбилеи, механика, гидродинамика, аэродинамика, Московский университет, ЦАГИ, ВВИА.

DOI: 10.31857/S0869587322010029

“Можно говорить, что математическая истина только тогда должна считаться вполне обработанной, когда она может быть объяснена всякому из публики, желающему её усвоить”.
Н.Е. Жуковский, 1894

В марте 2021 г. исполнилось 100 лет со дня кончины Николая Егоровича Жуковского — выдающегося учёного-математика и механика, своим трудом внёсшего значительный вклад в развитие многих направлений механики, организатора науки, педагога высшей школы, создателя крупнейшей научной школы в области аэрогидродинамики, основателя Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ) и Военно-воздушной инженерной академии (ВВИА). Его заслуги в науке были высоко оценены и отмечены ещё при жизни. Творческому пути учёного посвящена обширная литература, написанная в том числе его современниками — коллегами, учениками и последователями. Что нового можно добавить к портрету новатора через столько лет после его ухода?



БОГДАНОВ Андрей Николаевич — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, учёный секретарь Научного совета РАН по механике жидкости и газа.

менниками — коллегами, учениками и последователями. Что нового можно добавить к портрету новатора через столько лет после его ухода?

Оглядываясь на прошедшее столетие “без Жуковского”, важно увидеть и понять, как и куда идёт механика — дело жизни отечественного научного гиганта. Выдающаяся роль механики именно как фундаментальной науки, её место в ряду других фундаментальных наук, её актуальность в очередной раз подвергаются сомнению. Опять приходится отбивать попытки ревизии позиций этой науки, по экспертному заключению академика Г.Г. Чёрного¹, являющейся научной основой большинства, если не всех, областей техники — промышленности, строительства, транспорта, служащей базой развития важнейших областей народного хозяйства, необходимой опорой в использовании для нужд общества научных достижений других фундаментальных наук [1, с. 7–9].

Характеризуя личность Жуковского, обычно употребляют такие эпитеты, как “могучий и светлый образ” [2, с. 161]. В советские времена Нико-

¹ Горимир Горимирович Чёрный (1923–2012) — выдающийся советский и российский учёный-механик, педагог высшей школы, организатор науки.



Николай Егорович Жуковский (1847–1921)

лай Егорович был одним из символов отечественной науки, “отцом русской авиации”. Таким он представляется и сейчас. Огромное число учёных-механиков прямо или косвенно являются его учениками или последователями. Его имя носят крупные научные и учебно-научные центры страны – Центральный аэрогидродинамический институт и Военно-воздушная инженерная академия, а также целый наукоград – город Жуковский.

Своей научной и научно-организационной работой, продолжавшейся более 50 лет, Н.Е. Жуковский оказал определяющее влияние на развитие механики в нашей стране. Вошли в научную терминологию “профиль Жуковского”, “схема Жуковского–Рошко”, “теорема Жуковского”, “функция Жуковского”, “условие Чаплыгина–Жуковского”, “винты НЕЖ²” и т.д. В монографии “Механика в СССР за 30 лет” [3] его имя упоминается на 49 страницах, намного опережая своих коллег и последователей (у следующего за ним С.А. Чаплыгина – 35 страниц), оно относится почти ко всем основным разделам современной ему механики – к аналитической динамике, устойчивости движения, теории гироскопов, теории механизмов, гидроаэромеханике, пограничному слою, турбулентности, теории крыла и винта са-

молёта, неустановившимся движениям в жидкости и газе, глассированию, гидравлике, гидродинамической теории фильтрации (кроме теории упругости, хотя работы в этом направлении у Жуковского были). Через 20 лет количество ссылок на Жуковского лишь возросло – в одном только втором томе четырёхтомника “Механика в СССР за 50 лет” [4] – 64 страницы упоминаний.

Происходит периодическое обращение к научному наследию Жуковского, его научным, педагогическим методам и принципам с целью их осмысления и переосмысления [5–8]. Современные условия показали важность для правильного пути развития выбора достойных человеческих ориентиров, фигур “могучих и светлых”, каким был Николай Егорович.

Во времена Жуковского стоял вопрос о самой справедливости описания реального течения жидкости уравнениями гидродинамики. Ему же, опираясь на заимствованные и свои оригинальные методы, удалось решить множество практических задач. Но сегодня можно определённо сказать, что учёный оставил нам нечто большее, чем только научные результаты и педагогические идеи. По сути, своим примером он определил механику и как важнейшую часть наук о природе, и как руководство для решения задач практики, и как научный фундамент для развития инженерных наук [8, с. 166].

Сделать фигуру отечественного светила науки более объёмной позволяют изданные в 2017 г. воспоминания [9] талантливого математика, астрофизика, геофизика, эколога, революционера-большевика, участника революционных событий в России начала XX в. В.А. Костицына (1883–1963), которого можно считать учеником и младшим коллегой Николая Егоровича. Позволяют, поскольку писал Костицын свои воспоминания, относясь и к Жуковскому, и к русской жизни как бы со стороны – будучи, с 1928 г., в эмиграции во Франции. Говоря об учёном, Костицын даёт ему такую характеристику: “С научной точки зрения он <Жуковский> был, конечно, крупной фигурой, но не настолько, как хотят его представить: круг интересов очень узок” [9, с. 187–189].

Анализ тематики работ Жуковского показывает, что Костицын был неправ. До нас дошли 152 публикации на 3150 страницах, курсы лекций на 3210 страницах, отзывы и персоналии. Известны 338 его докладов. Более 60% (66 и 63%³) в них составляет гидрогазодинамика, но отдельные работы посвящены другим разделам механики, и не только ей. Живое интересовали его и вопросы техники [10, с. 194]. Наиболее важной своей работой по гидродинамике Жуковский считал статью “Видоизменение метода Кирхгофа для определе-

²Николай Егорович Жуковский.

³ Подсчёты Г.Ю. Степанова [25, с. 4].

ния движения жидкости в двух измерениях при постоянной скорости, данной на линии тока”. Знамениты его статьи “О присоединённых вихрях”, “К вопросу о величине диаметра водонепорной колонны, соединённой длинной трубой с открытым резервуаром”, “О распределении скоростей в водопроводных трубах”, “О гидравлическом таране”, “О парадоксе Дюбуа”. Но работы “Геометрическая интерпретация рассмотренного С.В. Ковалевскою случая движения тяжёлого твёрдого тела около неподвижной точки”, “Новый гироскопический аппарат”, “Элементарная теория гироскопов” относятся к теоретической механике, “О прочности движения” — к анализу устойчивости, сами за свою тематику говорят названия “Вывод основных формул теории упругости”, “Распределение давлений на нарезках винта и гайки”, “О прочности велосипедного колеса”, “Об упругой оси турбины Лаваля и об осях с качающимися подшипниками”, “Упрощённый вывод уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости”, “О трении смазочного слоя между шипом и подшипником”, “К вопросу о давлении диэлектрического газа в электрическом поле”, отзыв о сочинении В.А. Михельсона “О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей”, “Определение скорости движения продуктов горения в заводской трубе по фотографии выбрасываемого ей дыма”. Приложения теории мелкой воды и уединённые волны рассмотрены в статье “О спутной волне”. Работы “О снежных заносах”, “Теоретическое исследование о движении подпочвенных вод”, “О влиянии давления на насыщенные водой пески” можно отнести к механике природных процессов, “Об артиллерийских снарядах Шапеля” — к внешней баллистике.

Н.Е. Жуковский живо отзывался на исследования других учёных. Показательны названия его статей и докладов: “Н.А. Умов как математик”, “Описание инструмента Кемпе”, “Замечания по поводу предыдущей статьи г. Млодзеевского”, “Труды С.В. Ковалевской по прикладной математике”, “По поводу летательного снаряда Чернушенко”, “Работы Гельмгольца по механике”, “Планиграф Дарбу”, “Рычажной дубликатор Делонэ”, “Локсодромический маятник Гесса”, “О гироскопическом шаре Д.К. Бобылёва”, “Обобщение задачи Бьеркнеса”, “Об упругой оси турбины Лаваля”, «Письмо к автору “Влияние поступательной скорости колеса”», “Теория прибора инженера Ромейко-Гурко”, “О замене диска Рэлея”, “О работах Д.И. Менделеева по сопротивлению жидкостей”, “Краткая характеристика литературных работ А.И. Пермякова по водяным турбинам”, “О механизме Л.В. Ассур”, “Геометрическое доказательство первой и второй теорем С.А. Чаплыгина”, “Летательный аппарат Отто Лилиенталя”. Его занимал даже женский вопрос,

и он написал статью “Участие женщины в воздухоплавании”.

Интересен комментарий к работе Жуковского другого крупнейшего отечественного учёного и инженера А.Н. Крылова⁴: “В конце 1880-х и начале 1890-х годов Н.Е. Жуковский иногда наезжал и делал в Техническом обществе свои доклады или выступал на чужих докладах. Мне особенно запомнился его доклад “Об определении места порчи в водопроводных трубах”; конечно, не тогда, когда вода бьёт фонтаном до пятого этажа, нет, а когда снаружи ничего не видно. Метода Жуковского, основанная на рассмотрении записи давления после внезапного открытия клинкетта, установлена блестящим математическим анализом. Эта метода тогда же была проверена опытами на московском водопроводе и вошла в практику” [11, с. 336].

В бытность студентом автору статьи довелось на физико-механическом практикуме выполнять эксперимент по гидравлическому удару. Помнятся указания преподавателя на этой задаче закрывать задвижку как можно резче. Несмотря на наши далеко ушедшие от Жуковского знания, никакую трубу разорвать нам не удалось, да и создаваемый нами скачок давления в трубе был слабо различим.

Показателен приведённый в качестве эпиграфа к этой статье принцип Жуковского о качестве добытого знания. Николай Егорович следовал ему в жизни. Как вспоминал Б.И. Россинский, однажды соколёнок набросился на голубя-турмана (турманы — голуби, делающие “мёртвые петли”) и вырвал у него половину перьев хвоста; пожалевшие голубя дети, выщипав оставшиеся перья, подровняли ему хвост, он продолжил летать, мог делать повороты, но турманом быть перестал [10, с. 190]. Жуковский сумел объяснить особенности маневрирования птицы крыльями и своим новым хвостом (для выполнения поворота этого оказывалось достаточно, для “мёртвой петли” — уже нет), последующее наблюдение за птицей позволило эти особенности разглядеть. По воспоминаниям В.Л. Александрова, когда сын Жуковского Сергей, отчаянный мотоциклист, опрокинулся на своём транспортном средстве, Николай Егорович выполнил работу “К динамике автомобиля”, рассмотрев более общий случай, и сделал доклад по ней на собрании Московского математического общества (1917) [10, с. 197].

У Костицына можно прочесть о Жуковском: “Его называют отцом русской авиации: это не совсем справедливо по отношению к адмиралу Можайскому, который осуществил первый летающий аппарат в 1882 году” [9, с. 187]. Не согласим-

⁴ Алексей Николаевич Крылов (1863—1945) — выдающийся русский и советский учёный-математик, механик и инженер-кораблестроитель.

ся с Костицыным. А.Ф. Можайский⁵ был, конечно, в определённом смысле предшественником Жуковского, но остался энтузиастом-одиночкой и заметного влияния на развитие авиационной науки не оказал, не говоря уже о создании научной школы или организации авиационного профиля.

Костицын писал: “Первое сообщение Николая Егоровича на авиационные темы имело место в 1903 году на одном из внеочередных заседаний Московского математического общества. Я хорошо помню на доске его чертежи, изображавшие схематизированные крылья, со стрелками, означавшими действующие силы, и с указанием на роль мотора; был дан подсчёт количества лошадиных сил на единицу веса для существующих моторов, и Николай Егорович прибавил, что, собственно, уже сейчас такой аппарат возможен: он и был осуществлён братьями Райт именно в 1903 году. Что же касается до теоретических построений в том виде, как Жуковский рассказывал их, то они не являлись новостью и в литературе по авиации можно указать много его предшественников, иногда — за несколько десятков лет до него; я считаю работы Чаплыгина⁶, во всех отношениях, гораздо более замечательными” [9, с. 187, 188].

Заметим, что увлёк в механику и подготовил С.А. Чаплыгина как учёного⁷ именно Жуковский. Хотя как учёный и педагог Сергей Алексеевич оказался полной противоположностью учителю — исключительным теоретиком-аналитиком, а учеников в обычном понимании этого слова не имел.

Костицын в своих воспоминаниях охарактеризовал и гражданскую позицию Н.Е. Жуковского. Она показательна. Когда в январе 1911 г. в ответ на административное вмешательство в жизнь Московского университета, выразившееся в фактической отмене университетской автономии, многие профессора университета, в том числе Чаплыгин, оставили преподавание в этом учебном заведении, Жуковский этого не сделал. Костицын пишет: “Николай Егорович привлекал своей изумительной наивностью, простодушием, приветливостью: в нём было что-то детское. Он совершенно неспособен к интригам и, вместе с тем, очень законопослушен: не понимал, как можно идти против правительства. <...> Иначе говоря, Жуковский весьма последовательно стоял на точке зрения апостола Павла <нет власти не от Бога>.

Никакого подслуживания, подлизывания; просто дух борьбы был ему совершенно чужд” [9, с. 188]. Впоследствии эту позицию аргументированно поддержал А.Ю. Ишлинский⁸, сказав, что те, кто занимается наукой, — умнее, но те, кто стоит у власти, — сильнее, и с этим надо считаться. Отметим, что в 1895 г. исполнилось 25 лет служебной деятельности Жуковского, по тогдашним порядкам ему следовало уходить в отставку по выслуге лет. Желая продолжать работу, Жуковский дважды подавал прошения на высочайшее имя и дважды, в 1895 и 1902 гг., получал разрешение остаться в должности профессора на службе в университете и в Техническом училище с сохранением содержания. В 1911 г. его демонстративный уход чиновников Министерства образования никак не впечатлил бы. Но тут есть и ещё одна важная причина остаться в университете — забота о студентах, об их надлежащем образовании. Уход лучших педагогических кадров наносит трудновосполнимый урон обучению.

В своей работе Жуковский проявлял примерное спокойствие. Показателен следующий случай, по воспоминаниям Б.И. Россинского: желая посмотреть кинофильм о полёте братьев Райт (хроника экранной газеты “Патэ-журналь”), Николай Егорович по приглашению зашёл в кинозал на Петровке. Но интересующий его фильм был предворён кинокомедией “Похождения Глупышкина”. Вынужденный смотреть комедию, учёный от души смеялся. Последовавшая затем кинолента оказалась столь кратка, что пришлось остаться на следующий сеанс, вторично смотреть “Глупышкина”, и лишь затем полёты Райт. Но сочувствующим Николай Егорович сказал, что напротив, отлично отдохнул [10, с. 191].

В научных же спорах Жуковский проявлял твёрдость: «Как оппонент на защите диссертаций он не терпел, когда ему противоречили, и он отвечал так, как ответил Штернбергу⁹, не признававшему правильности возражений Жуковского: “Нет уж, позвольте, Павел Карлович, если я говорю вам, что это так, то это действительно так”» [9, с. 188]. Твёрдость проявлял он и в ситуациях, которые ему не нравились, и умел показать своё недовольство надолго запоминающимся образом. А.А. Архангельский вспоминал, как подвозивший Жуковского на автомобиле водитель, пренебрегая правилами уличного движения, обогнал слева быстро идущий трамвай и проскочил в узкую щель между ним и встречным трамваем. Николай Егорович, тронув водителя за плечо, по-

⁵ Александр Фёдорович Можайский (1825–1890) — русский военный деятель, контр-адмирал, изобретатель — пионер авиации.

⁶ Сергей Алексеевич Чаплыгин (1869–1942) — выдающийся русский и советский учёный-механик и организатор науки.

⁷ Чаплыгин хотел стать дипломатом и в Московский университет поступил вынужденно, из-за недостатка денег на платное обучение в Институте восточных языков.

⁸ Александр Юльевич Ишлинский (1913–2003) — выдающийся советский и российский учёный-механик и организатор науки.

⁹ Павел Карлович Штернберг (1865–1920) — российский учёный-астроном, революционер-большевик.

просил остановиться, ни слова не говоря, вышел из машины и далее последовал пешком [10, с. 195].

Механика не есть только прикладная математика. Механика — раздел человеческого знания со своим широчайшим предметом и специфическим методом. Своей работой Жуковский ясно демонстрировал это. Он умел сводить решаемую задачу к дифференциальным уравнениям, которые интегрировались. Любил участвовать в экспериментах и получать научные результаты в существующих условиях, подчас совсем не подходящих для нормальной работы. Например, представление об обстановке ведения научной работы в Кучинском аэродинамическом институте (первом по этому профилю не только в нашей стране, но и в Европе) дают воспоминания Костицына: «Для меня стало ясно, что научное оборудование <...> Рябушинского¹⁰ ничего не стоит: большая аэродинамическая труба не давала равномерного потока воздуха, а приспособления для униформизации вызывали добавочные вихри; аппарат для изучения трения воздуха совершенно не соответствовал цели; мелкие измерительные приборы — трубка Пито, анемометры и т.д. — давали колоссальные ошибки. А что сказать об “опытах” Рябушинского с возбуждением “колебаний в эфире” путём сбрасывания с башни чугунной плиты и улавливания микрофоном “эфирных волн”? Но хозяином он был хорошим: плотина и электрическая станция продолжали без отказа работать; постройки были по-купечески основательны; рабочие <...> хорошо подобраны; библиотека — хорошо составлена (помимо научных, она содержала большое количество исторических книг, беллетристики и даже порнографии — конечно, на французском языке)» [9, с. 215]. Д.В. Рябушинский подчёркивал, что Кучинский аэродинамический институт был частным учреждением и нередко представлял неприятные для Жуковского условия, что быстро привело к прекращению их сотрудничества [10, с. 151].

В настоящее время натурный эксперимент становится всё более трудновыполнимым в условиях монетизации научной деятельности и бездумной замены его на компьютерное моделирование, возможности которого в переработке огромного объёма данных стремительно и впечатляюще растут. С болью в сердце приходится констатировать, что следствием такой политики становятся техногенные катастрофы, например, обрушения Басманного рынка, аквапарка “Трансвааль” из-за ошибки в компьютерной программе расчёта сооружений [1, с. 26].

¹⁰Дмитрий Павлович Рябушинский (1882–1962) — русский предприниматель, основатель и владелец Кучинского аэродинамического института. После революции 1917 г. эмигрировал во Францию.

Проходящая в стране реформа высшего образования сопровождается изгнанием самого термина “механика” из названий подразделений вузов с заменой его на математическое моделирование. Так, на механико-математическом факультете Южного федерального университета (Ростов-на-Дону), ставшем Институтом математики, механики и компьютерных наук, 7 из 12 входящих в его структуру кафедр (алгебры и дискретной математики; вычислительной математики и математической физики; дифференциальных и интегральных уравнений; информатики и вычислительного эксперимента; высшей математики и исследования операций; математического анализа и геометрии; математического моделирования; прикладной математики и программирования; теоретической и компьютерной гидроаэродинамики; теории упругости, теории и методики математического образования; технологий автоматизации в бизнесе) имеют в названии термины “вычислительный”, “моделирование”, “программирование” и ни одного раза — “механика”. А ведь созданный первым механико-математический факультет МГУ был назван так неслучайно, механики были сильнее [12].

В лице Жуковского отечественная высшая школа имела выдающегося педагога, слушатели лекций Николая Егоровича отмечали его живую, увлекательную манеру преподавания, склонявшую интересы многих в сторону механики. Его отличительной чертой как педагога было стремление и умение поддержать начинающего исследователя, «он никогда не позволял себе сказать, что задача неисполнима; он говорил: “Я пробовал заниматься этим вопросом, но у меня ничего не вышло; попробуйте Вы, может быть, у Вас выйдет”»¹¹. Характерной в его отношениях с молодёжью была полная откровенность. А.Н. Туполев вспоминал, что на вопрос студента о содержании (физическом назначении) какой-нибудь обеспечивающей процесс детали Жуковский мог и ответить: “Нет, с самим содержанием не могу сказать, как это будет” [10, с. 180]. Простота в общении позволяла студентам “с наивностью молодости” ставить ему вопросы, «на которые ещё не было ответа на земле, а он со спокойной мудростью отвечал: “Подумаю”».

Жуковский понимал, что педагогическая работа требует особых качеств, в этой связи интересно воспоминание И.И. Артоболевского¹², как выходя из аудитории после защиты С.А. Чаплыгина докторской диссертации, Николай Егорович сказал: “А профессора из него не получится”

¹¹Из речи профессора С.А. Чаплыгина на похоронах Н.Е. Жуковского.

¹²Иван Иванович Артоболевский (1905–1977) — выдающийся советский и российский учёный-механик и организатор науки.

[13, с. 151]. К чести Чаплыгина, тот заразительно смеялся над этой историей, но, действительно, при возможности преподавательскую работу оставил.

Последние годы Н.Е. Жуковского были омрачены катастрофой быта в условиях послереволюционного разорения, тяжёлыми болезнями, безвременной кончиной любимой дочери — Лены. Он не был счастлив в личной жизни, не имел собственной семьи. Силы он черпал только в любимой работе и в общении с многочисленными учениками и сподвижниками — достойный пример силы человеческого духа.

Жуковский уже при жизни получил (великое счастье!) коллегу и советчика в лице своего ученика Чаплыгина. Примеры высоты отношений — в их переписке.

Из письма Чаплыгина Жуковскому:

“Глубокоуважаемый Николай Егорович! Мне казался очень странным вид полученного Вами интеграла... Вы, по рассеянности, допустили недосмотр... Но, что всего любопытнее, <...> Вы незаметно для себя дали в высшей степени интересную интерпретацию движения (вращения) тела в жидкости... Если Вы посмотрите формулы на обороте, то это будет совершенно ясно.

Искренне Вас почитающий С. Чаплыгин” [14, с. 187].

После ухода Н.Е. Жуковского именно Сергей Алексеевич Чаплыгин выступил продолжателем его дела, сыграв выдающуюся роль и как учёный-исследователь, и как глава школы учёных-механиков, и как организатор науки. Только что основанные Жуковским и находившиеся в зачаточном состоянии ЦАГИ и ВВИА превратились в центры мирового уровня [15, 16], в научном семинаре ЦАГИ под руководством Чаплыгина выросла плеяда учёных-механиков, составивших цвет этой науки.

Уже через пять лет после кончины Жуковского, в 1926 г., в отчётном докладе о работе ЦАГИ за девять лет возглавлявший институт Чаплыгин говорил, что задача института — изучение механических свойств воздуха и воды в целях технического использования их для нужд человека (а иногда и в целях борьбы с их вредными влияниями), подчёркивал полную готовность ЦАГИ идти навстречу промышленности. Особо отмечал необходимость создания развитой экспериментальной базы, считая, что одного математического исследования, анализа будет недостаточно: “Н.Е. один из первых прекрасно понял, что одной только математики в деле исследования будет мало” [17, с. 220].

С установлением советской власти отечественная механика получила мощную государственную поддержку, стала крайне востребована в условиях курса на скорейшую индустриализа-

цию страны: “...теория, если она является действительно теорией, даёт практикам силу ориентировки, ясность перспективы, уверенность в работе, веру в победу нашего дела”¹³. Высказанное Жуковским положение, что человек “полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу своего разума”¹⁴, со всей очевидностью подтвердилось. Уже через 15 лет заслуги ЦАГИ отмечали на государственном уровне. Торжественное заседание прошло в Большом театре в Москве, рядом с учёными в президиуме — руководители страны Сталин и Ворошилов. Над сценой во всю ширину красовались слова: “У нас не было авиационной промышленности, у нас она есть теперь. Сталин”. 1930-е годы стали годами подлинного “завоевания неба”. На прочном научном фундаменте развивалась авиационная промышленность, зародившаяся в ЦАГИ же под руководством А.Н. Туполева. Её успехи были впечатляющими — например, беспосадочный перелёт в 1937 г. советского самолета АНТ-25 из Москвы в Америку. Наряду с развитием авиационной науки и конструированием новых отечественных самолётов, в ЦАГИ были заложены крупные научные центры в области моторостроения, авиационных материалов, промышленной аэродинамики, гидротехники. Реформированная Академия наук СССР получила отделение технических наук, в её структуре появились институты механического профиля — Институт механики и Институт машиноведения.

В 1940 г. Чаплыгин добился возобновления конкурса работ на соискание премий имени Н.Е. Жуковского, и когда за первую премию соперничали две работы — теоретическая С.А. Христиановича “Задача обтекания профиля методом Чаплыгина” и практическая Г.М. Мусинянца “Аэродинамические весы больших аэродинамических труб Т-101 и Т-104”, решительно выступил в поддержку работы Мусинянца. С.А. Христианович вспоминал: «Сам Чаплыгин эту <решённую мной> задачу решить не смог. В моей работе он понимал всё и отдал предпочтение Гургену Никитичу: “Это теория, а это вещи!”» [14, с. 184].

Учёные-механики внесли достойный вклад в победу советского народа в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг., разрабатывая новые и совершенствуя старые виды вооружения. Их усилиями был преодолен “снарядный голод” [18], “поставлена на вооружение” кумуляция, грозным возмездием врагу стали реактивные снаряды “Катюша”, доработка которых продолжалась в военные годы [19], и многое другое. Затем огромного напряжения сил потребовало создание ядер-

¹³Из речи И. Сталина на конференции аграрников-марксистов 27 декабря 1929 г.

¹⁴Из речи Н.Е. Жуковского на Общем собрании X Съезда естествоиспытателей и врачей в Киеве 25 августа 1898 г.

ного щита, предотвратившего новые мировые войны [20].

После окончания Великой Отечественной войны развитие механики получило новое продолжение в крупных отечественных научных центрах, в частности, в организованном в 1948 г. ЦНИИмаше, ряд институтов механического профиля был открыт в созданном в 1957 г. Новосибирском академгородке. В 1959 г. постановлением Совета министров РСФСР с целью развёртывания научно-исследовательских работ в области механики, направленных на решение важнейших задач современной техники, и улучшения подготовки необходимых для народного хозяйства специалистов при главном вузе страны — МГУ имени М.В. Ломоносова — был создан Институт механики с полномасштабной, развитой, во многом уникальной экспериментальной базой.

Фундаментальные труды были написаны по всем разделам механики [21–27], к юбилеям видных учёных и научных организаций выходили сборники научных работ учеников, коллег и сотрудников Жуковского [28–32].

В 1956 г. в ряду других комитетов по отдельным специальностям был создан Национальный комитет СССР по теоретической и прикладной механике, который разработал свой собственный устав (Положение) с широко поставленными задачами и придерживался его, сохраняя известную самостоятельность в течение всей своей деятельности. В первый состав Национального комитета в количестве 48 человек вошли крупнейшие отечественные учёные-механики того времени: И.И. Артоболевский, Н.Х. Арутюнян, А.А. Благоврастов, И.Н. Векуа, В.З. Власов, Л.А. Галин, Н.И. Глаголев, А.Л. Гольденвейзер, Н.Н. Давиденков, А.А. Дородницын, А.А. Ильюшин, А.Ю. Ишлинский, М.В. Келдыш, А.А. Космодемьянский, П.Я. Кочина, Е.А. Красильщикова, М.А. Лаврентьев, С.Г. Лехницкий, Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье, А.И. Макаревский, М.Д. Миллионщиков, Г.К. Михайлов, Н.И. Мухелишвили, Х.М. Муштари, А.И. Некрасов, А.А. Никольский, В.В. Новожилов, В.М. Панфёров, Г.И. Петров, Н.И. Пригоровский, И.М. Рабинович, Ю.Н. Работнов, Х.А. Рахматулин, Г.Н. Савин, Л.И. Седов, С.В. Серенсен, Н.А. Слёзкин, В.В. Соколовский, Л.Н. Сретенский, В.В. Струминский, Г.В. Ужик, Ф.И. Франкль, С.А. Христианович, Н.А. Цытович, Н.Г. Четаев, К.Н. Шевченко, Б.Н. Юрьев [33]. Преемственность дела Жуковского поддерживало и то, что А.И. Некрасов и Б.Н. Юрьев были прямыми его учениками, а А.Л. Гольденвейзер, А.А. Дородницын, А.А. Ильюшин, М.В. Келдыш, М.А. Лаврентьев, Л.Г. Лойцянский, А.И. Макаревский, М.Д. Миллионщиков, А.А. Никольский, Л.И. Седов, В.В. Струминский, Ф.И. Франкль и С.А. Христианович — вос-

питанниками или (в разные годы) сотрудниками ЦАГИ. Отметим здесь выдающуюся роль Николая Егоровича в воспитании многих поколений учёных-механиков Московского университета. В своё время он шёл в университет с трепетом. «...итти в университет да ещё на математический факультет, я не вижу никакой дороги, — писал Жуковский своей матери. — Университет ужасно меня пугает. Оканчивая университет, нет другой цели, как сделаться великим человеком, а это так трудно; кандидатов на имя великого так много» [34, с. 10, 11]. Отрадно видеть, что многие выпускники университета, например, М.В. Келдыш¹⁵, это стремление Жуковского стать великим осуществили. Более трети членов первого состава Национального комитета по механике были выпускниками Московского университета.

Национальный комитет сформулировал для себя весьма широкий круг задач: подготовка и проведение конференций по различным вопросам механики; содействие координации научных исследований по отдельным вопросам механики и укрепление связей научных работников СССР; укрепление связей советских механиков с зарубежными специалистами и организациями в области механики; распространение за рубежом материалов о развитии механики в СССР; рассмотрение вопросов издания в СССР журналов по механике; представительство механиков СССР в Международном союзе по теоретической и прикладной механике (IUTAM); подготовка и проведение мероприятий, связанных с участием советских механиков в международных и национальных зарубежных конгрессах и конференциях по механике; информирование советской научной общественности о работе международных и национальных зарубежных организаций механиков; содействие обмену научной информацией между советскими и зарубежными механиками.

В 1960 г. в нашей стране состоялся первый из крупнейших отечественных научных форумов — Съезд по теоретической и прикладной механике, работа которого проходила в нескольких секциях: общей и прикладной механики (подсекции: аналитическая механика и теория устойчивости движения, гироскопия, колебания и регулирование, теория механизмов и машин); механики жидкости и газа (общая гидромеханика, аэродинамика и газовая динамика, магнитная гидродинамика и теория неустановившегося движения газа, движение вязкой жидкости, пограничный слой, турбулентность и теплопередача, движение жидкости и газа в пористых средах, прикладная гидродинамика); механики твёрдого тела (теория упругости, теория пластичности и ползучести,

¹⁵ Мстислав Всеволодович Келдыш (1911–1978) — выдающийся советский учёный-математик и механик, организатор науки.

теория пластинок и оболочек, динамические задачи, механика грунтов, строительная механика, реология). Пленарные, секционные и подсекционные доклады на съездах отражали важные перспективные направления, содержали итоговые и текущие результаты исследований по ведущим темам, материалы по важным датам в истории механики. Так, единственный пленарный доклад на II Всероссийском съезде теоретической и прикладной механики (Москва, 1964) был сделан Л.И. Седовым на тему “Галилей и основы механики (к 400-летию со дня рождения Г. Галилея)”.

Съезды, собиравшие тысячи участников, проводились регулярно, один раз в 4–5 лет, до 1991 г. Публиковались Труды съезда, содержавшие обзорные доклады или аннотации. Тематика докладов охватывала и классические, и новые разделы механики, теоретические и экспериментальные, фундаментальные и прикладные направления, а также смежные и комплексные науки.

По инициативе и под руководством Г.Г. Чёрного в 2001 г., после десятилетнего перерыва, вызванного постперестроечным обвалом всех сторон жизни в стране, съезды возобновились. Их научная программа с годами претерпевала изменения. Так, пленарные доклады на VIII Всероссийском съезде (Пермь, 2001) не проводились. На IX и X съездах (Нижний Новгород, 2006, 2011) их было по три: “Движение твёрдых тел по поверхности с сухим трением”, “Общая теория вихрей, симплектическая геометрия и гироскопическая стабилизация”, “Актуальные проблемы энергообеспечения общества” — на одном и “Проблемы разработки робототехнических и биомехатронных систем с тактильным чувствлением”, “Многомасштабность и многофазность”, “Суперкомпьютерные технологии и их роль в науке и промышленности” — на другом. Число пленарных докладов постепенно росло. На XI Всероссийском съезде (Казань, 2015) их было уже 10: “Развитие исследований в области механики в Казанском государственном университете”, “Г.Г. Чёрный и его роль в развитии газовой динамики”, “Метаматериалы в электромагнетизме, оптике и акустике”, “Гидродинамика и термодинамика климата”, “Задачи механики в авиационном двигателестроении”, “Динамика и управление локомоциями мобильных роботов”, “Локализованные турбулентные структуры в круглой трубе”, “Мембранно-сорбционный метод обогащения гелия из природного газа: идея, научное обоснование, технология”, “Задача Лаврентьева–Ишлинского. Развитие идеи”, “Сверхпрочность и механизмы деформации объёмных материалов”. Столько же пленарных докладов делегаты представили на XII Всероссийском съезде (Уфа, 2019): “Механические методы изучения уравнений состояния вещества в экстремальных условиях”, “Теории слоистых структур, в том числе сэндвичей”, “Ме-

ханика в перспективных производственных технологиях: как сделать технологию лучше?”, “Инновационные технологии в детской травматологии и ортопедии”, “Задачи механики в авиационном двигателестроении”, “Многомерные течения с детонацией в энергетических установках”, “Физические и математические модели бафтинга”, “Стратифицированные течения и внутренние волны в глубоководных разломах и каньонах Атлантики”, “Проблемы механики в нефтегазодобывающей промышленности”, “Математическое моделирование природных склоновых потоков”.

От механики обычно не ждут событий, подобных научным революциям в физике [35], но по истине революционным можно считать открытие способов высокоскоростного (до 1000 м/с!) подводного движения после разработки сравнительно малоразмерного носового кавитатора, взаимодействующего с потоком жидкости перед телом, большая часть которого оказывается в создаваемой кавитатором паровой суперкаверне [36].

Давно понятые законы невозможности создания вечного двигателя тем не менее не ограничивают создание, благодаря направленному преобразованию энергии, их аналогов. В качестве примера укажем разработанный под руководством Ю.Л. Якимова волновой движитель [37], использующий энергию волнения морской поверхности. Создаются также аппараты, поведение которых, на первый взгляд, противоречит законам механики, к ним можно отнести ветромобиль, движущийся против ветра [38].

Применение в научном эксперименте разработанной учёными-механиками теории размерности и подобия [39] позволяет изучать в лабораторных условиях грандиозно масштабные задачи глубоководного (до 200 м) старта [40]. Уяснение механических особенностей процессов движения жидких и газообразных сред — добиваться осуществления важных для приложений труднореализуемых (ненаблюдаемых) в обычных условиях режимов — протяжённых (до 6 диаметров) ламинарных затопленных газовых струй [41], крупно-размерных (до 3.5 м) плёночных фонтанов [40], безвихревого слива [42], или объяснить хорошо известные природные явления, например, гашение волн на поверхности воды дождём [43]. Отметим и отдельное гармонизирующее очарование гидродинамики [44].

Эпоха покорения неба сменилась эпохой покорения космоса. Впечатляющие достижения механики в этом направлении продемонстрированы значительным количеством успешных космических миссий. Сложность преодолённых проблем показательно характеризует высказанная самирония учёных-механиков: после доклада академика А.Ю. Ишлинского о причинах отказа гироскопической системы ракеты-носителя Келдыш

совершенно спокойно сказал: “После такого замечательного доклада Александра Юльевича даже тому, кто не знает теории гироскопов, делается ясно, что летать надо вообще без гироскопов” [45, с. 263]. Показательны предложенные механиками выходы из иных сложных ситуаций. Так, в 1960 г. при подготовке запуска первой автоматической станции к Марсу в состав её научного оборудования предполагалось включить аппарат (спектрорефлексометр), способный определить, есть ли на планете вода, и тем самым — есть ли на Марсе жизнь. По различным причинам старт задержался. Чтобы стартовать и успеть подойти к Марсу, надо было уменьшить массу полётного груза, поэтому прибор потребовали снять. Тогда М.В. Келдыш предложил испытать его в земных условиях. Прибор показал: “Нет жизни на Земле!”, после чего спектрорефлексометр был удалён без обид даже со стороны его создателей и дал экономии в 12 кг полётного веса [45].

Успехи механики в решении задач навигации и автоматического управления позволили осуществить полёт многоразовой транспортной космической системы “Буран” в автоматическом режиме [46] и создали условия для развития технологий частично контролируемого перераспределения управления объектом между экипажем и бортовым оборудованием, повышающего безопасность космических пилотируемых полётов [47].

На научную систематическую основу поставлено изучение неожиданных в обычной жизни, но грозящих смертельной опасностью нелинейных резонансных процессов [48]. Приводящая к развитию резонансного процесса связь частоты вынуждающей силы с частотой возможных собственных колебаний в исследуемой области может быть не предугадываемой заранее и неожиданно нетривиальной, условия для развития разрушительного процесса могут быть созданы непреднамеренно.

Многолетняя исследовательская работа позволила построить математическую теорию и одного из опаснейших для человечества природных явлений — землетрясений. По мнению С.С. Григоряна [49], прогноз землетрясений возможен так же, как и вошедший в повседневную жизнь прогноз погоды, для этого надо организовать сеть наблюдательных станций, регистрирующих хорошо известные предвестники землетрясений (локальные разрушения горных пород в районе очага будущего землетрясения и т.п.). Показательно обращение к учёным-механикам Католикоса всех армян Вазгена I. “Известно, — сказал Католикос, — что во всей Армении — горной стране — только наша резиденция никогда не была подвержена разрушительному воздействию землетрясений. Мы, иерархи церкви, объясняем это Божьей за-

щитой и Его покровительством. Но должно ведь быть и научное объяснение этого феномена” [50, с. 4]. Действительно, Эчмиадзин расположен на природной подушке из мягких пород, естественном гасителе всех колебаний земной поверхности, но наблюдения показывали, что колебания земной поверхности могут и усиливаться, если под верхними слоями находятся слои относительно большей податливости по сравнению с глубинными породами. Парадоксальным оказалось обнаружение факта особого сочетания толщины податливого слоя и его механических свойств, при котором только и происходит ослабление колебаний, подобно тому, как эта делает рессорная подвеска транспортного средства [51].

Наряду с развитием классических направлений механики появились и развиваются новые — механика гетерогенных сред [52], электромагнитная гидродинамика [53, 54], механика композитов [55], наноматериалов [56] и материалов с памятью [57].

Новые задачи выдвигает биомеханика [58], их суть можно охарактеризовать как последовательное внедрение идей и методов механики в решение глубоких собственно биологических проблем и задач практической медицины. Так, осмысление сделанного биологами и врачами с иной точки зрения и с иными мерками понятого и непонятого показало совершенно другой уровень истинного *незнания*. Количество не имеющих удовлетворительного ответа вопросов к чисто механическим структурам и процессам в живых организмах впечатляет, не дано разумное объяснение многим диагностическим приёмам в медицине, иногда имеющим многовековую традицию. Вместе с тем отрадно констатировать взаимное плодотворное влияние механики и биологии друг на друга, например, обнаружение в крови естественных аналогов предложенных полимерных добавок для изменения её текучести. Идеи об участии механических факторов в морфогенезе при развитии организма, определение видовой ценности некоторых механических “качеств” организма приводят к новым концепциям биологического характера. В иной плоскости ставятся вопросы в биомеханике: каковы принципы работы биологических двигателей, как химическая энергия преобразуется в механическую, как осуществляется управление движением живых организмов? Разработки по результатам решения задач механики способны помочь человеческому организму в экстремальных, рабочих, ситуационных условиях, по медицинским показаниям в ортопедии, а на более технологичном уровне в качестве примера приведём автоматическую коррекцию функции вестибулярной системы при минимальном участии человека [59].

В сфере интересов механики была и остаётся спортивная тематика. Предложенные исследования аэродинамики лыжников, велосипедистов, саночников, бобслеистов в аэродинамических трубах помогли ряду из них добиться значительных успехов на крупнейших мировых соревнованиях, включая Олимпийские игры [40].

Механика вносит свой достойный вклад в решение проблем экологии. В конце 1970-х годов при массовой застройке городов был поднят вопрос о комфортном проживании, включавший обеспечение должного проветривания жилых районов, отсутствие застойных зон, а также зон повышенной скорости ветра. Первые научные работы по теме были выполнены при разработке плана застройки жилого района Чертаново-Северное в Москве. Исследования в целях улучшения ветрозащищённости прошли в городе нефтяников Сургуте. Подобные вопросы изучались в Москве на жилом комплексе “Сердце столицы”, круглогодичном катке в районе Крылатское, хоккейном стадионе на Ходынском поле, а также на олимпийских спортивных объектах в Сочи, торговом центре и стадионе “Зенит-арена” в Санкт-Петербурге [40].

В лаборатории механики природных процессов НИИ механики МГУ был создан полимерно-минеральный композит кавэласт, способный, не растворяясь в воде, увеличить свой объём в 50 раз! Новое вещество может служить прекрасным гидроизоляционным материалом, практически неограниченное число раз подвергаясь размоканию и высушиванию, при этом оно не теряет своих свойств (если в воде растворено не слишком много солей) и не портится со временем. Добавленные в песок всего 5–10% вещества, набухая, заполняют поры и полностью прекращают фильтрацию жидкости. Такой изоляционный слой толщиной в 5 см способен выдержать давление воды более 30 атм, не пропустив ни капли. Покрыв дно и стенки каналов и водохранилищ кавэластовой смесью, можно полностью ликвидировать потери воды от просачивания в грунт. Намечавшаяся в своё время переброска воды сибирских рек в каналы Средней Азии дала бы около 30–50% всего их расхода [40].

Именно перед механикой встаёт задача предотвращения грядущей экологической катастрофы — гигантского нарастания перерабатываемых объёмов мусора, актуальность утилизации которого стоит уже и в околоземном пространстве [60].

Отрадно вслед за Жуковским видеть новых учёных-механиков, считающих своим жизненным предназначением занятия исследовательской работой с целью понять и объяснить окружающий мир. Яркие примеры — М.А. Лаврентьев (1900–1980) [61], Л.И. Седов (1907–1999) [62],

С.А. Христианович (1908–2000) [63], А.А. Дороницын (1910–1994) [64], М.В. Келдыш (1911–1978) [65], А.А. Ильюшин (1911–1998) [18], Х.А. Рахматулин (1909–1988) [66], Г.И. Петров (1912–1987) [67], А.Ю. Ишлинский (1913–2003) [68], В.В. Струминский (1914–1998) [69], С.С. Григорян (1930–2015) [70].

Актуальность механики сохраняется, она много дала и ещё больше даст новых решений насущных проблем человечества в технической сфере, способствуя повышению культуры в целом. Девиз — решение реальных задач механики, ставший руководящим для большинства учеников московской школы механики времён Жуковского, — остаётся таковыми и поныне, и не только для представителей московской школы, и не только для механиков-теоретиков. А “там впереди идут молодые, сильные <...> старость и юность сливаются в непрерывной работе для познания истины”¹⁶.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чёрный Г.Г.* Слово о вечно новой механике. М.: МГОФ “Знание”, 2011.
2. Люди русской науки. М.—Л.: ГТТЛ, 1948.
3. Механика в СССР за тридцать лет: 1917–1947 / Под ред. В.З. Власова и др. М.—Л.: ГТТЛ, 1950.
4. Механика в СССР за 50 лет. В 4 т. Т. 2. Механика жидкости и газа / Под ред. Л.И. Седова, Я.Б. Зельдовича, А.Ю. Ишлинского, М.А. Лаврентьева, Г.К. Михайлова, Н.И. Мухомелишвили, Г.Г. Чёрного М.: Наука, 1970.
5. *Келдыш М.В.* Научное наследие профессора Н.Е. Жуковского // Техника воздушного флота. 1947. № 1. С. 5–10.
6. *Христианович С.А.* Научное наследие Н.Е. Жуковского / Доклад на заседании, посвящённом 30-летию со дня смерти Н.Е. Жуковского, 19 марта 1951 г. // Известия АН СССР. Отделение технических наук. 1951. № 8. С. 1137–1151.
7. *Белоцерковский С.М.* Жуковский, его наследие и современность // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 1997. № 4. С. 8–25.
8. *Степанов Г.Ю., Чёрный Г.Г.* Теоретическая и прикладная гидроаэродинамика в трудах Н.Е. Жуковского (К 125-летию его избрания профессором по кафедре механики в Московском техническом училище) // Сборник научно-методических статей. Теоретическая механика. Вып. 25. М.: Изд-во Московского университета, 2004. С. 165–176.
9. *Костицын В.А.* “Моё утраченное счастье...”: Воспоминания, дневники. М.: Новое литературное обозрение, 2017.
10. Н.Е. Жуковский. М.: ФГУП “Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского”, 2007.

¹⁶Из речи Н.Е. Жуковского на торжественном заседании в Политехническом музее 16 января 1911 г., посвящённом 40-летию юбилею его научной деятельности.

11. Крылов А.Н. Воспоминания и очерки. М.: Изд-во АН СССР, 1956.
12. Николай Алексеевич Слѣзкин (1905–1991). Материалы к биографии / Сост. А.Н. Богданов, И.П. Семёнова. Под ред. академика РАН Г.Г. Чёрного. М.: Изд-во Московского университета, 2009.
13. Артоболевский И.И. Жизнь и наука: воспоминания. М.: Наука, 2005.
14. Штрихи к портрету академика С.А. Чаплыгина // Академик С.А. Чаплыгин. Ред.-сост. Г.С. Бюшгенс. М.: Наука, 2010.
15. Бюшгенс Г.С., Бедржицкий Е.Л. На рубеже двух столетий. М.: Изд-во ЦАГИ, 2008.
16. 50 лет Военно-воздушной инженерной ордена Ленина Краснознамённой академии имени профессора Н.Е. Жуковского: 1920–1970 (исторический очерк) / Отв. ред. Н.М. Федяев. М.: Изд-во ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1970.
17. Доклад С.А. Чаплыгина о работе ЦАГИ на заседании коллегии НТО ВСНХ 4 июня 1926 г. // Академик С.А. Чаплыгин. Ред.-сост. Г.С. Бюшгенс. М.: Наука, 2010.
18. Ильющин А.А. Динамика // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика, механика. 1994. № 3. С. 79–87.
19. Институт теоретической и прикладной механики. Годы, люди, события / Под ред. А.М. Харитоновой. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
20. Атомный проект СССР: Документы и материалы / Под общ. ред. Л.Д. Рябева. М.: Наука; Физматлит, 1998.
21. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. Изд. 2-е. М.: Наука, 1977.
22. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Изд. 4-е, испр. и доп. М.: Изд-во АН СССР, 1954.
23. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. Изд. 3-е, перераб. М.: Наука, 1980.
24. Ильющин А.А. Пластичность: основы общей математической теории. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
25. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твёрдого тела. Изд. 2-е, испр. М.: Наука, 1988.
26. Рахматулин Х.Р., Демьянов Ю.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. М.: Логос, 2009.
27. Чёрный Г.Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Физматгиз, 1959.
28. Механика сплошной среды и родственные проблемы анализа. К восьмидесятилетию акад. Н.И. Мухелишвили / Под ред. Л.И. Седова. М.: Наука, 1972.
29. Проблемы гидродинамики и механики сплошной среды. К 60-летию академика Л.И. Седова. М.: Физматлит, 1969.
30. Избранные проблемы прикладной механики / Сборник работ, посвящённый 60-летию академика В.Н. Челомея. М.: ВИНТИ, 1974.
31. Газовая динамика: Избранное. В 2 т. / Ред.-сост. А.Н. Крайко и др. М.: Физматлит, 2000.
32. Механика: избранные труды. В 3 т. М.: Изд-во Московского университета, 2010.
33. Первый состав Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике / Сост. А.Н. Богданов, Г.К. Михайлов. Под ред. д-ра физ.-мат. наук Г.К. Михайлова. М.: КДУ, Университетская книга, 2018.
34. Голубев В.В. Жуковский. М.: Институт компьютерных исследований, 2002.
35. де Бройль Л. Революция в физике (Новая физика и кванты). Изд. 2-е. М.: Атомиздат, 1965.
36. Якимов Ю.Л. Об осесимметричном срывном обтекании тела вращения при малых числах кавитации // Прикладная математика и механика. 1968. Вып. 3. С. 499–501.
37. Константинов Г.А., Якимов Ю.Л. Расчёт тяги двигателя судна, использующего энергию морских волн // Известия РАН. МЖГ. 1995. № 3. С. 139–143.
38. Голованов С.А., Досаев М.З., Климина Л.А. Методические аспекты задачи о стабилизации неустойчивого движения ветромобиля // Теоретическая механика. Вып. 31. М.: Изд-во Московского университета, 2020. С. 46–50.
39. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1981.
40. Институт механики 60 лет. М.: КДУ, Университетская книга, 2019.
41. Зайко Ю.С., Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Чичерина А.Д. Исследование затопленных струй с увеличенной длиной начального ламинарного участка // Известия РАН. МЖГ. 2018. № 1. С. 97–106.
42. Павельев А.А., Штарев А.А. Влияние симметрии положения сливного отверстия на формирование нестационарных вихревых воронок // Известия РАН. МЖГ. 2005. № 5. С. 182–188.
43. Якимов Ю.Л. Причина гашения волн дождём // Известия СО АН СССР. 1959. № 5. С. 678.
44. Бэтчелор Дж., Моффат Г., Сэффмен Ф. и др. Современная гидродинамика. Успехи и проблемы. М.: Мир, 1984.
45. Черток Б.Е. Вспоминая Келдыша / М.В. Келдыш Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2002.
46. Башилов А.С., Лопота В.А. К 30-летию полёта многогоразового орбитального корабля “Буран” // Идеи и новации. 2018. Т. 6. № 3. С. 16–20.
47. Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Базлев Д.А. и др. Проектирование бортовых систем интеллектуальной поддержки экипажа летательного аппарата // Прикладная физика и математика. 2019. № 1. С. 31–42.
48. Ганиев Р.Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надёжность, безопасность и бесшумность. М.: R&CDynamics, 2013.
49. Григорян С.С. Можно ли предсказывать землетрясение? 21.08.1989. Машинописная рукопись. Архив кабинета-музея академика Л.И. Седова НИИ механики МГУ.
50. Богданов А.Н. Должно быть и научное объяснение... (К 75-летию учёного-механика Самвела

- Григоряна) // Московский университет. 2005. № 12 (4117).
51. Григорян С.С. Гипотеза Каталикоса Вазгена I // Наука и жизнь. 1990. № 6. С. 51.
 52. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1, 2. М.: Наука, 1987.
 53. Куликовский А.Г., Любимов Г.А. Магнитная гидродинамика. М.: Физматгиз, 1962.
 54. Ватажсин А.Б., Любимов Г.А., Регирер С.А. Магнитогидродинамические течения в каналах. М.: Наука, 1970.
 55. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. М.: Изд-во Московского университета, 1984.
 56. Овидько И.А., Семёнов Б.Н., Шейнерман А.Г. Механика деформируемых наноматериалов. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета, 2013.
 57. Материалы с памятью формы и новые медицинские технологии / Под ред. В.Э. Гюнтера. Томск: НИИ мед. материалов и имплантатов с памятью формы СФТИ при ТГУ; НПП “МИЦ”, 2010.
 58. Григорян С.С., Любимов Г.А., Регирер С.А. Проблемы биомеханики // Актуальные проблемы механики. М.: Изд-во Московского университета, 1984. С. 76–83.
 59. Тихонова К.В. Математические задачи коррекции активности вестибулярных механорецепторов. Автореферат дисс. ... на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. М., 2019.
 60. Кириллов В.А., Багатуров И.Р., Тарлецкий И.С. и др. Анализ концепций очистки околоземного космического пространства // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. № 2. С. 343–351.
 61. Век Лаврентьева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
 62. Богданов А.Н. Создатель крупнейшей научной школы в области механики, “отец спутника” Леонид Иванович Седов (1907–1999) / Судьбы творцов российской науки и культуры. Серия “Московский университет: эпохи и люди”. Т. 6. М.: Полиграф сервис, 2017. С. 138–152.
 63. Академик С.А. Христианович / Ред.-сост. Г.С. Бюшгенс. Изд. 4-е, доп. и перераб. М.: Наука, 2008.
 64. Академик А.А. Дородницын / Автор-сост. Г.А. Амирьянц. М.: Наука, 2013.
 65. М.В. Келдыш. Творческий портрет по воспоминаниям современников // Отв. ред. член-корреспондент РАН А.В. Забродин. М.: Наука, 2001.
 66. Нигматулин Р.И. Слово о Рахматулине // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2017. № 41. С. 200–205.
 67. Георгий Иванович Петров. 100 лет со дня рождения. М.: ИКИ, 2012.
 68. Академик А.Ю. Ишлинский – выдающийся учёный-механик. М.: Наука, 2013.
 69. Академик В.В. Струминский / Ред.-сост. А.Ф. Киселёв и др. М.: Наука, 2018.
 70. Богданов А.Н. Создатель крупнейшей научной школы в области механики природных процессов Самвел Самвелович Григорян (1930–2015) / Судьбы творцов российской науки и культуры. Серия “Московский университет: эпохи и люди”. Т. 6. М.: Полиграф сервис, 2020. С. 230–244.

...реструктуризацию накопленной задолженности надо использовать именно как механизм повышения самодостаточности региональных экономик...
Послание Президента РФ Федеральному Собранию РФ

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЮДЖЕТНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ РЕГИОНОВ

© 2022 г. Б. Л. Лавровский^{a,b,*}, Е. А. Горюшкина^{a,c,**}, Е. А. Шильцин^{a,c,***}

^a Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, Новосибирск, Россия

^b Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

^c Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*E-mail: boris.lavrovski@gmail.com

**E-mail: e.goryushkina@mail.ru

***E-mail: e.shilcin@gmail.com

Поступила в редакцию 14.07.2021 г.

После доработки 03.09.2021 г.

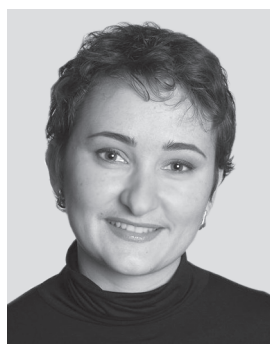
Принята к публикации 06.09.2021 г.

Статья посвящена развитию нового подхода к формированию межбюджетных отношений, разработке и описанию адекватного ему экономико-математического инструментария. Суть подхода, с одной стороны, заинтересовать, с другой — экономически принудить региональные власти к инвестированию с целью развития экономического и налогового потенциала. Основная идея авторов состоит в том, чтобы рост государственных и муниципальных услуг в регионах поставить в определённую и достаточно жёсткую зависимость от собственных доходов; разрушить надежду на улучшение бюджетной обеспеченности исключительно за счёт внешней поддержки, межбюджетных трансфертов.

В предлагаемой модели рассматривается возможность региональной власти направить имеющиеся бюджетные ресурсы не только на обеспечение текущих расходов, но также на инвестирование в развитие экономики региона, то есть увеличение его экономического и налогового потенциала. Иллюстрация модельных расчётов осуществлена на примере регионов Сибирского федерального округа. Значение рассматриваемых в статье первых результатов расчётов в основном касается методики, оцениваются прежде всего возможности и свойства используемого модельного аппарата. Характер инвестиционного поведения на уровне СФО в целом, особенности динамики показателя вариации бюджетной обеспеченности регионов определяются, как и в любой другой экономико-математической модели, принятыми гипотезами относительно экзогенных величин. Их соответствие реальным значениям в статье специально не обсуждается.

Ключевые слова: регион, межбюджетные отношения, трансферты, бюджетная обеспеченность регионов, налоговый потенциал, бюджетные доходы, инвестиции, региональная дифференциация, модель.

DOI: 10.31857/S0869587322010054



ЛАВРОВСКИЙ Борис Леонидович — доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник ИЭОПП СО РАН, профессор НГТУ. ГОРЮШКИНА Екатерина Алексеевна — кандидат экономических наук, доцент НГУ, старший научный сотрудник ИЭОПП СО РАН. ШИЛЬЦИН Евгений Александрович — кандидат экономических наук, доцент НГУ, старший инженер ИЭОПП СО РАН.

Известная особенность налогово-бюджетных отношений в Российской Федерации состоит в том, что в бюджетах многих российских регионов собственные налоговые и неналоговые доходы часто не достигают 60–70% расходов. Одновременно региональная дифференциация объёма государственных и муниципальных услуг, обеспечиваемых собственными доходами, является чрезвычайно высокой. Объективно необходимый в этих условиях трансфертный механизм должен играть роль структурной коррекции, призванной в известной степени выравнивать доходы и расходы региональных бюджетов, а также показатели бюджетной обеспеченности регионов.

Основная проблема, которая здесь возникает, — риск консервации или даже углубления сложившихся диспропорций в связи с адаптацией субъектов экономических отношений, прежде всего региональных администраций, к этому механизму, рост потребности в перераспределяемых ресурсах. Решение этой проблемы предполагает формирование институциональных и иных условий, при которых сама необходимость в перераспределительном механизме последовательно ослабевает.

Эту мысль, например, в Германии применительно к федеральным землям законодатель формулирует следующим образом. Финансовая поддержка должна быть только помощью собственным усилиям, но ни в коем случае не премией за недостаточное финансовое обеспечение земли по собственной вине; важнее всего, чтобы в самих землях воля и расчёт на собственные силы не ослабевали и чтобы не нарушалось стремление к собственной инициативе и росту производства [1]. Другое дело, что фактический механизм регионального финансового выравнивания в Германии весьма далёк от этого принципа [2].

В России, несмотря на многолетние увещевания, в том числе с самых высоких трибун, необходимых институциональных условий пока не создано; в существующей парадигме межбюджетных отношений ключевые инструменты развития налогового потенциала в регионах не находят себе места. В результате долги субъектов Федерации в тенденции существенно возрастают, межрегиональные диспропорции, если и сокращаются в последние годы, то весьма натушно и непоследовательно. В условиях крайне слабой макроэкономической динамики, вялой инвестиционной деятельности рассчитывать на крупные структурные сдвиги не приходится. Как заметил ректор (ныне научный руководитель) НИУ ВШЭ Я.И. Кузьминов, “если мы хотим на деле добиться существенного улучшения инвестклимата в субъектах Федерации, то в их бюджетах должна быть представлена инвестиционная компонента. Если её не

будет, то о прорыве в этой области я бы говорить не стал” [цит. по 3].

Несколько лет назад мы писали, что застарелые проблемы уже побуждают к приёму горьких лекарств в духе экономического принуждения к инвестированию¹. Содержанию, иллюстрации и развитию нового подхода к формированию межбюджетных отношений, базирующегося на современном экономико-математическом инструментарии, в основном и посвящена настоящая статья.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ПОДХОДА. ОПЫТ КИТАЯ

Существуют различные представления о соотношении макроэкономического роста и межрегиональных пропорций [5]. Например, в соответствии с современной концепцией Всемирного банка попытки обеспечить равномерный пространственный рост средствами государственной политики заведомо обречены на провал, более того, способны привести к обратному, угнетающему воздействию; усилия по необоснованному региональному выравниванию вредят прогрессу [6]. Наша позиция, разработанная в основном к концу 1990-х — началу нулевых годов, с идейной точки зрения предшествует этой концепции. Сглаживание, писали мы, “является частью более общей проблемы регионального сбалансированного роста и развития. Суть концепции регионального выравнивания состоит в... переходе от методов временного ослабления региональной дифференциации, базирующихся преимущественно на процессах территориального перераспределения ресурсов, к методам, основанным на региональном развитии с упором прежде всего на собственные силы... обеспечение социально приемлемых жизненных стандартов в регионах возможно только в тенденции” [7–9].

Коротко говоря, речь идёт о том, что в случае колизии “экономический рост — региональная (социальная) справедливость” приоритет отдаётся росту. Основной посыл состоит здесь в том, что людям, по-видимому, важнее улучшение показателя качества жизни в году t по отношению к году $t-1$, чем сопоставление этого показателя с ближними и дальними соседями; близость упомянутого показателя к среднему значению по стране жителей регионов не устраивает, если не повышается сама средняя оценка.

В конце 1990-х — середине нулевых годов, исследуя модели межбюджетных отношений в странах мира, известный российский экономист призывал “всеми силами” отрешиваться от китайского варианта [10, с. 106]. Между тем опыт Китая

¹ Концептуальный посыл рассматриваемого подхода ранее изложен, в частности, в статье [4].

в этом отношении весьма любопытен. Первые примерно 15 лет развития китайских реформ (с 1978 г.) ознаменовались фискальной децентрализацией, структурным налоговым манёвром в пользу регионов, которые одновременно имели возможность самостоятельно брать кредиты у банков и выпускать облигации. Финансовые ресурсы государства во всё большей степени стали концентрироваться на нижних этажах бюджетной системы. По данным Национального бюро статистики, например, в 1985 г. центр в Китае собирал 38.4% налогов, в 1993 г. его доля упала до 22% [11]. Раскрепощение инициативы на местах, возможность для властей регионов самим искать дополнительные источники финансирования послужили мощным мотивом для развития предпринимательской деятельности, привлечения частных, в том числе иностранных, инвестиций. Повышение удельного веса регионов в финансовых ресурсах государства сопровождалось гигантским ростом этих ресурсов в абсолютном выражении.

Разумеется, столь крупные манёвры не могут не порождать серьёзных проблем. Углубились диспропорции в уровне развития побережья и бедных континентальных районов, долги региональных правительств, несмотря на существенные ограничения, касающиеся возможности кредитования, введенные налоговой реформой 1994 г., уже на конец 2010 г. составили 10.7 трлн юаней (1.65 трлн долл.) – почти 15% ВВП страны (по паритету покупательной способности) [12]. Но это уже другой вопрос. Главное, что удалось создать в нищей стране мощный источник развития, сделать, хотя и не без издержек, первый, самый трудный шаг на пути последующего финансового и экономического могущества.

РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РОСТ. СОВРЕМЕННАЯ РОССИЙСКАЯ ПРАКТИКА

В целом по всем регионам России в течение посткризисного периода (2010–2018) среднегодовые темпы прироста ВРП составили примерно 2.3%. Вместе с тем немалое число регионов демонстрирует высокие по нынешним временам показатели – 3.5 и более процентов. Всего таких регионов тринадцать.

Немалый интерес представляет вопрос об истоках преимущественного регионального роста, порождающих его обстоятельствах. Эти факторы будем рассматривать в контексте инвестиционной деятельности, её количественных и качественных оценок (табл. 1). Норма накопления характеризует количественные масштабы инвестиционной деятельности, приростная капиталоемкость – качественную сторону инвестиционного ресурса (обратный показатель – отдача от

единицы капитала). Как видим, в быстроразвивающихся регионах значение нормы накопления в ряде случаев несколько ниже общероссийского показателя, но, как правило, существенно его превышает.

Ряд субъектов Федерации (Белгородская, Брянская, Иркутская, Московская области) с сопоставимой с российской оценкой нормы накопления сумели обеспечить преимущественный рост ВРП за счёт низких затрат инвестиций на единицу прироста ВРП. Характерный для этих четырёх регионов феномен преимущественного и одновременно инвестиционно-экономного типа развития может быть связан с менее капиталоемкой отраслевой структурой экономики и (или) наличием инвестиционных проектов в регионе с высокими показателями эффективности.

КЛЮЧИ К РЕГИОНАЛЬНЫМ ИНВЕСТИЦИЯМ

В соответствии с теорией, подтверждённой современной российской практикой и китайским опытом, сердцевинной регионального экономического роста и развития выступают инвестиции, сопровождаемые наличием спроса на порождаемые ими продукты и услуги, а также известной свободой в принятии решений, атмосферой заинтересованности и ответственности. Отсутствие инвестиций не может быть компенсировано ни призывами, ни сколь угодно совершенными фискальными правилами. Между тем в целом по России объём капитальных вложений, осуществляемых за счёт средств регионального и муниципального бюджета по всем 12 направлениям расходов², сократился с 12.6% в итоговых расходах консолидированных региональных бюджетов в 2016 г. до 10.9% в 2020 г. Из них вложения по направлению “Национальная экономика” в 2020 г. составили чуть менее половины.

Масштабы капитальных вложений в субъектах Федерации заметно колеблются. Бесспорными региональными лидерами являются в 2020 г. Республика Крым (29.4%) и Севастополь (27.0%). Ещё в семи регионах их доля в расходах консолидированных региональных бюджетов сравнительно большая – примерно от 15 до 23%: Москва (15.5%), Ненецкий а.о. (20.9%), Республики Адыгея (22.9%), Северная Осетия – Алания (17.8%), Ингушетия (17.9%), Карачаево-Черкесская Республика (15.1), Сахалинская область (16.3%).

² Национальная экономика, образование, ЖКХ, здравоохранение, физическая культура и спорт, социальная политика, общегосударственные вопросы, культура и кинематография, охрана окружающей среды, национальная безопасность и правоохранительная деятельность, национальная оборона, средства массовой информации.

Таблица 1. Некоторые характеристики экономического развития быстроразвивающихся российских регионов, 2010–2018 гг. (в постоянных ценах)

| Регион | Среднегодовые темпы прироста ВРП, % | Обобщённая норма накопления за период, % | | Удельные инвестиции, руб./руб.* |
|-----------------------|-------------------------------------|--|-----------------|---------------------------------|
| | | В постоянных ценах | В текущих ценах | |
| Россия в целом | 2.3 | 24.9 | 22.6 | 11.4 |
| Республика Дагестан | 3.5 | 46.4 | 36.4 | 14.3 |
| Республика Мордовия | 3.8 | 36.1 | 30.2 | 10.2 |
| Астраханская область | 6.2 | 44.5 | 34.1 | 7.7 |
| Белгородская область | 4.9 | 23.9 | 20.6 | 5.4 |
| Брянская область | 3.9 | 26.3 | 24.2 | 7.3 |
| Воронежская область | 4.1 | 46.4 | 32.8 | 12.4 |
| Иркутская область | 4.0 | 21.0 | 22.9 | 5.7 |
| Калужская область | 4.1 | 32.1 | 27.3 | 8.7 |
| Курская область | 4.1 | 27.2 | 25.6 | 7.1 |
| Московская область | 3.7 | 23.7 | 20.5 | 7.0 |
| Ростовская область | 3.7 | 31.5 | 23.6 | 9.1 |
| Тамбовская область | 4.3 | 48.0 | 36.8 | 12.2 |
| Тульская область | 4.3 | 27.5 | 24.4 | 6.7 |

* Затраты инвестиций на единицу прироста ВРП в целом за период; приростная капиталоемкость.

Источник: рассчитано по [13].

На другом полюсе насчитывается четырнадцать регионов, где удельный вес капитальных вложений в консолидированных бюджетах составляет от 3.1 до 6.0%: Кировская, Ульяновская, Смоленская, Мурманская, Курганская, Ивановская, Омская, Орловская, Тверская, Владимирская, Оренбургская области, Еврейская а. о., Красноярский, Алтайский, Забайкальский края. Рассчитывать на экономический рост за счёт собственных ресурсов здесь, как и в большинстве других регионов, разумеется, не приходится.

Существуют три принципиальные возможности появления инвестиционного компонента в региональных бюджетах. Одна из них связана с вертикальным перераспределением налоговых поступлений на нижние этажи бюджетной системы в духе китайского опыта. Это позволило бы не всем, но 20–30 субъектам Федерации создать необходимые финансовые источники [14]. Разумеется, подобная мера далеко не способствовала бы региональному выравниванию. В связи со сложившейся вертикалью власти, а главное, современной геополитической и внешнеэкономической ситуацией идею вертикального перераспределения едва ли можно считать реалистичной.

Другая возможность — расширение финансового потенциала региона за счёт долговых обязательств и обращение части или всего долга в источник развития. Долги — обоюдоострый инструмент: при одних обстоятельствах они способны обеспечить мощный прорыв, при других — породить банкротство.

Наконец, весьма болезненная в социальном плане возможность создания бюджета развития — перераспределение части имеющихся финансовых ресурсов, включая, разумеется, трансферты из федерального бюджета, с удовлетворения текущих потребностей на решение перспективных задач. Речь идёт о временном сокращении прироста затрат на оказание государственных и муниципальных услуг в пользу наращивания налогового потенциала за счёт инвестиций, создания новых эффективных рабочих мест и возможности в перспективе на этой основе перекрыть вероятные текущие потери в услугах.

Идея перераспределения в целях формирования бюджета развития отнюдь не является экзотической, находит всё большее понимание среди управленческой элиты, проникает в общественную практику. Сложившемуся традиционному представлению об инвестициях в региональных

бюджетах, направленных исключительно на поддержание и развитие социальной инфраструктуры, противостоят современные взгляды, согласно которым роль бюджетных инвестиций, особенно в контексте частно-государственного партнёрства, много шире. По словам губернатора Новосибирской области А.А. Травникова, “настоящий бюджет развития — не инвестиции, направленные на обновление инфраструктуры, а инвестиции, которые в будущем дадут дополнительный эффект по развитию региональной экономики, приведут к увеличению собственной доходной базы субъекта РФ” [15]. По данным замминистра финансов Л.В. Горнина, у 45 субъектов Федерации в 2020 г. объём налоговых доходов и расходов заметно вырос по сравнению с предыдущим годом. Причём увеличение расходов произошло преимущественно в форме инвестиций и капитальных вложений. При этом регионы не только сами вкладывали деньги, но и смогли привлечь в промышленный сектор частные инвестиции [16].

Очередной (новейший) этап эволюции поддержки региональных бюджетов связан с инициативой Правительства РФ списывать регионам долги по бюджетным кредитам, если они будут направлять высвобождаемые средства на развитие инфраструктуры, необходимой для реализации инвестиционных проектов [17]. Кроме того, предлагается предоставлять регионам долгосрочные бюджетные кредиты на осуществление инфраструктурных проектов, причём данный вид кредитов не будет учитываться при расчёте индикаторов долговой нагрузки, на него не будут влиять ограничения по дефициту бюджетов [18].

Концептуальное значение предлагаемых мер, на наш взгляд, достаточно существенно. Обращено, наконец, внимание на инвестиции как на ключевой инструмент долговременного роста собственных доходов регионов. Эти меры переключаются с ранее предложенными подходами [19, 20], развиваемыми в настоящей статье. Набирающий силу тренд с необходимостью требует теоретического осмысления и адекватного методического подспорья.

СТРУКТУРА ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ РОСТА БЮДЖЕТНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ

Важнейший результат социально-экономического развития региона — его бюджетная обеспеченность, фактически иллюстрирующая меру отклонения объёма государственных и муниципальных услуг на одного человека от среднего показателя по стране. Исходным пунктом при расчёте бюджетной обеспеченности региона выступают доходы его консолидированного бюджета. Возникает важный и сложный вопрос: за счёт каких ресурсов — внешних или внутренних — воз-

можен рост бюджетной обеспеченности, какова здесь роль трансфертов из федерального бюджета? Для оценки значения внешнего фактора в динамике бюджетной обеспеченности воспользуемся показателем, характеризующим долю трансфертов в структуре расходов консолидированного регионального бюджета, хотя мы отдаём себе отчёт в том, что этот приём далеко не совершенен.

Из 85 субъектов РФ сколько-нибудь существенное увеличение показателя бюджетной обеспеченности (не менее 4 п.п.) за период 2015–2019 гг. наблюдалось в 28 случаях. Только в семи из них (г. Москва, Белгородская, Магаданская области, Камчатский, Красноярский края, г. Севастополь, Республика Алтай) доля безвозмездных поступлений (трансфертов) в общих расходах консолидированного регионального бюджета практически не выросла или даже сократилась. Ещё в трёх случаях (Республика Коми, Республика Крым, Приморский край) она увеличилась не более чем на 1.8 п.п. (в целом по России 1.6 п.п.)³. В трудном с точки зрения эпидемической ситуации 2020 г. заметный рост бюджетной обеспеченности по отношению к 2019 г. (не менее 4 п.п.) наблюдался в 39 субъектах. Только в трёх из них рост этого показателя сопровождался сокращением финансовой помощи (Чукотский автономный округ — на 6.4 п.п., Республика Алтай — на 5.1 п.п., Республика Ингушетия — на 14.1 п.п.). Ещё в трёх регионах доля трансфертов увеличилась не более чем на 2 п.п. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев успехи, связанные с увеличением бюджетной обеспеченности, совсем не обязательно обусловлены ростом собственных налоговых поступлений. В этом смысле ситуация в быстроразвивающихся регионах мало чем отличается от общероссийской картины (табл. 2).

Более половины быстроразвивающихся регионов за период 2015–2020 гг. показали положительную динамику бюджетной обеспеченности, хотя и в разной степени (табл. 2). С этой точки зрения выделяется Белгородская область. Принципиально, что улучшение бюджетной обеспеченности достигнуто здесь на фоне сокращения доли трансфертов в структуре расходов в 2019 г. и практически без её увеличения в 2020 г. Более того, эта доля ниже среднего показателя по России. Всё это означает, что успех области достигнут преимущественно благодаря собственным усилиям.

³ Следует отметить, что в ряде случаев (Республика Крым, Республика Алтай, г. Севастополь, Камчатский край) позитивные изменения сопровождаются сверхвысокой долей федеральных трансфертов в структуре расходов региональных бюджетов в течение всего периода.

Таблица 2. Характеристики бюджетной обеспеченности быстроразвивающихся регионов

| | Уровень бюджетной обеспеченности * | | | Доля безвозмездных поступлений в общих расходах**, % | | |
|-----------------------------|------------------------------------|----------|----------|--|-------------|-------------|
| | 2015 | 2019 | 2020 | 2015 | 2019 | 2020 |
| Российская Федерация | 1 | 1 | 1 | 21.1 | 18.1 | 24.2 |
| Белгородская область | 0.981 | 1.022 | 1.002 | 20.6 | 16.3 | 22.4 |
| Брянская область | 0.727 | 0.752 | 0.797 | 36.1 | 45.2 | 51.2 |
| Воронежская область | 0.805 | 0.790 | 0.852 | 18.5 | 20.9 | 27.1 |
| Калужская область | 0.970 | 0.995 | 1.007 | 9.1 | 14.9 | 24.8 |
| Курская область | 0.809 | 0.830 | 0.818 | 19.3 | 22.5 | 26.6 |
| Московская область | 1.298 | 1.155 | 1.132 | 7.6 | 6.6 | 11.0 |
| Тамбовская область | 0.823 | 0.665 | 0.714 | 34.3 | 35.8 | 42.6 |
| Тульская область | 0.898 | 0.832 | 0.859 | 8.9 | 11.1 | 19.8 |
| Астраханская область | 0.753 | 0.791 | 0.793 | 12.6 | 18.2 | 31.6 |
| Ростовская область | 0.748 | 0.674 | 0.716 | 16.4 | 14.5 | 22.8 |
| Республика Дагестан | 0.574 | 0.567 | 0.688 | 62.6 | 68.0 | 72.8 |
| Республика Мордовия | 0.859 | 0.742 | 0.833 | 25.2 | 33.3 | 43.3 |
| Иркутская область | 0.707 | 0.892 | 0.861 | 11.3 | 18.2 | 22.2 |

*Рассчитано на основе фактических итоговых доходов бюджетов на душу населения с учётом разницы в ценах бюджетных услуг по отношению к среднероссийскому значению. Разница в ценах по регионам учтена с помощью Индекса бюджетных услуг (ИБУ), используемого при распределении дотаций на выравнивания.

**С корректировкой на субвенции.

Источник: по данным Министерства финансов [21], Федерального казначейства [22].

Ещё три области заслуживают специального рассмотрения. Это прежде всего Московская область с чуть сократившимся, но наивысшим показателем бюджетной обеспеченности на протяжении всего рассматриваемого периода, в то время как доля трансфертов здесь существенно ниже средней по стране. Сюда же примыкают с улучшившимся рассматриваемым показателем Калужская и Иркутская области — в расходной части их бюджетов доля трансфертов ниже или сопоставима со средней по России.

В остальных пяти регионах, улучшивших бюджетную обеспеченность (Брянская, Воронежская, Курская, Астраханская области, Республика Дагестан), продвижение вперёд достигнуто во многом благодаря внешним ресурсам, увеличению доли трансфертов в структуре расходов (эта доля в указанных регионах в 2020 г. выше средней по РФ, хотя и в разной степени).

Главное, по-видимому, состоит в том, что прогресс, касающийся душевого потребления государственных и муниципальных услуг, во многих случаях, включая регионы-лидеры, достигается далеко не обязательно за счёт собственных усилий регионов, что не может не отражаться на решимости и готовности эти усилия приумножать.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДХОДА К АКТИВИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РЕГИОНАХ: БАЗОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЁТЫ

В предлагаемой модели рассматривается возможность исполнительных и законодательных органов государственной власти субъектов Российской Федерации направлять имеющиеся бюджетные ресурсы не только на обеспечение текущих расходов, но также на инвестирование в развитие экономики региона, то есть увеличение его экономического и налогового потенциала. Речь идёт об инвестиционных проектах, которые (со)финансируются из консолидированного регионального бюджета.

С целью оценить условия, при которых в принципе возможно заинтересовать регионы в развитии собственного налогового потенциала, разработана имитационная модель с элементами оптимизации и динамики. Основной замысел заключается в трансформации части расходов бюджетов регионов в инвестиции, бюджетные доходы от которых в перспективе могли бы быть направлены на рост государственных и муниципальных услуг (далее — бюджетных услуг).

Благодаря инвестициям, последующему увеличению налоговых поступлений происходит наращивание собственной доходной базы региональных бюджетов. Ключевая идея состоит в том, чтобы поставить рост бюджетных услуг в определённую, причём достаточно жёсткую зависимость от собственных доходов, разрушить надежду на улучшение бюджетной обеспеченности исключительно за счёт внешней поддержки, межбюджетных трансфертов. Принципиальная блок-схема модели представлена на рисунке 1.

Остановимся на содержательных аспектах модели и некоторых её важных допущениях. Максимизируется интегральный объём бюджетных услуг, оказываемых населению, в денежном выражении на всём множестве рассматриваемых регионов в течение всего прогнозного периода с учётом ставки дисконта, который соизмеряет во времени ценность предоставляемых бюджетных услуг.

Доходная часть региональных бюджетов, наряду с налоговыми поступлениями (собственные источники средств), включает также межбюджетные трансферты. Расходы осуществляются по двум крупным направлениям: часть средств идёт на финансирование текущих бюджетных услуг, оказываемых населению, другая часть — на инвестиционные цели. Источником развития, пополнения бюджета в каждом из регионов выступают инвестиции, точнее, продуцируемые ими (дополнительные) налоговые поступления.

Регионам доступны две принципиально разные стратегии:

- экономия на текущих расходах с целью наращивания объёма бюджетных услуг в динамике за счёт инвестиций;
- отказ от инвестирования, то есть неизменность собственных доходов в прогножном периоде на уровне базового года.

Объём инвестиций, трансфертов, а также бюджетных услуг, оказываемых каждым регионом в каждом году, являются в модели расчётными величинами. Общим (связующим) условием, превращающим совокупность регионов в систему, является ограничение на региональную дифференциацию показателей бюджетной обеспеченности, точнее, упрощённых их аналогов (объём бюджетных услуг на душу населения). Указанное ограничение задаётся на конец прогнозного периода. Величина налоговых поступлений от производства товаров и услуг определяется масштабами инвестиций, а также величиной бюджетной отдачи (от одной единицы) вложений. Этот показатель характеризуется в модели параметром α .

Среди важных допущений модели: численность населения в каждом регионе, как и совокупный объём трансфертов, остаются неизмен-

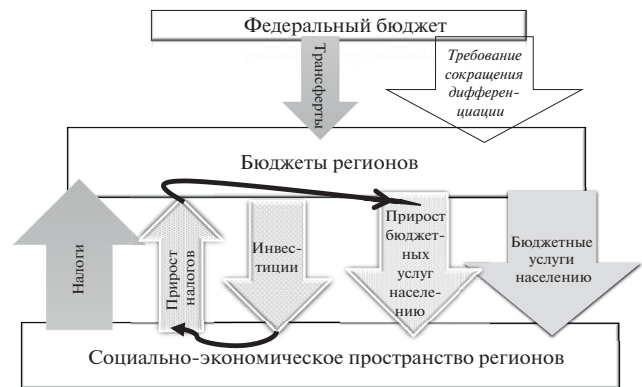


Рис. 1. Укрупнённая блок-схема модели

ными на уровне базового года в течение всего прогнозного периода; бюджет каждого региона в каждом году не может быть дефицитным; возможность заимствований не предусматривается.

Не вдаваясь в подробные комментарии, приведём математическую формулировку модели.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T G_{it} / (1+d)^t \rightarrow \max$$

$$G_{it} + I_{it} \leq TA_{it} + TR_{it}, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{i=1}^n TR_{it} \leq TR_t, \quad t = 1, \dots, T$$

$$TA_{it} = TA_{i0} + \sum_{\tau=1}^t I_{i\tau} \cdot \alpha, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T$$

$$\max_i \left(\frac{G_{iT}}{P_i} \right) - \min_i \left(\frac{G_{iT}}{P_i} \right) \leq k_{\text{var}} \cdot \left[\max_i \left(\frac{G_{i1}}{P_i} \right) - \min_i \left(\frac{G_{i1}}{P_i} \right) \right]$$

$$G_{it} \geq (1 - k_{\text{econ}}) \cdot G_{i0}, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T$$

$$G_{it} \leq k_{\text{max}} \cdot G_{i,t-1}, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 2, \dots, T$$

$$G_{it} \geq k_{\text{min}} \cdot G_{i,t-1}, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 2, \dots, T$$

$$G_{it}, I_{it}, TR_{it}, TA_{it} \geq 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T,$$

где i — индекс региона, t — индекс времени (год); n — число регионов; T — число периодов времени (временной горизонт модели, в годах). Параметры модели: α — налоговая отдача от инвестиций; d — ставка межвременного дисконта; k_{econ} — размер максимально возможной экономии на бюджетных расходах в каждом году (в долях); k_{max} и k_{min} — коэффициенты, соответственно, максимально и минимально возможного роста бюджет-

ных услуг за один год; k_{var} — коэффициент снижения различий между бюджетной обеспеченностью самого богатого и самого бедного региона. Исходные данные: G_{i0} — объём бюджетных услуг населению в базовом году по регионам, P_i — численность населения регионов. Переменные модели: G_{it} — объём бюджетных услуг населению; TR_{it} — трансферты; TA_{it} — налоговые сборы; I_{it} — инвестиции.

Расчёты осуществлялись на примере регионов СФО, выбор объекта исследования не является случайным. В округ входят как российские регионы-лидеры, так и аутсайдеры. Дифференциация бюджетной обеспеченности в СФО едва ли не самая высокая среди федеральных округов.

В рамках журнальной статьи не представляется возможным сколько-нибудь обширно представить полученные результаты. Имея в виду, что расчёты носят экспериментальный характер, имеют целью преимущественно отработку методики, в статье приводятся данные, относящиеся лишь к округу в целом, но не к отдельным субъектам Федерации⁴.

Важно подчеркнуть следующее обстоятельство. Как и во всякой экономико-математической модели, результаты расчётов определяются предположениями относительно экзогенных величин. Масштабы инвестиций, специфический срок их окупаемости, другие существенные характеристики решения зависят от гипотез относительно принятых возможных предельных значений экономии текущих затрат бюджета, величины дисконтирующего параметра и т.д. Приведённые ниже конкретные результаты — прежде всего иллюстрация возможностей используемого инструментария. Реалистичность посылок в настоящем цикле расчётов специально не обсуждается.

Базисным выступает 2018 г., прогнозный период простирается до 2040 г. Коэффициент дисконтирования в модели равен 10%. В расчётах, демонстрирующих основу методики, значение бюджетной отдачи от инвестиций представлено как единое по регионам. Учёт региональных различий требует подробного изложения и выходит за рамки данной статьи. Используемое в модели значение α равно примерно отношению фактического прироста налогов в бюджет СФО за 2016–2018 гг. к объёмам инвестирования за этот же временной промежуток и составляет 0.4.

Предусматриваемая условиями модели возможность экономить на текущих расходах (в определённых пределах) получила в расчётах далеко идущие последствия. Высвобождаемые год

от года благодаря экономии средства служат источником накопления основных фондов, значительного расширения бюджетных средств, заметного сокращения доли межбюджетных трансфертов в структуре доходов. Приоритет долгосрочных интересов, несмотря на наличие 10%-ного дисконта, приводит к инвестиционному буму. В первые годы прогнозного периода система находится в режиме “напряжённого накопления”; инвестиции достигают своего относительного максимума в структуре расходов бюджетов к 2024 г. Затем на фоне продолжающегося роста доходов бюджетов доля инвестиций постепенно сокращается⁵. Естественным следствием инвестиционного бума становится уменьшение в первые годы прогнозного периода объёма дисконтированных бюджетных услуг относительно варианта (проекта) без инвестирования (рис. 2). Но уже с 2024–2025 гг., благодаря росту доходов бюджетов, объём оказываемых дисконтированных бюджетных услуг в варианте с инвестициями заметно превосходит аналогичный объём без инвестиций. Данные, касающиеся объёма бюджетных услуг, накопленным итогом, представлены на рисунке 3. Как видим, уже с 2026 г. суммарные показатели бюджетных услуг (за 2019–2026 гг.) в инвестиционном варианте заметно перекрывают аналогичный показатель варианта “без инвестирования”.

Не выглядит тривиальной динамика дифференциации показателя душевых бюджетных услуг (рис. 4). На этапе инвестиционного напряжения, снижения (относительно базового года) общей величины бюджетных услуг вариация этого показателя достаточно стабильна. Однако в последующие годы интенсивного наращивания общей величины бюджетных доходов (плоды предшествующего накопления основного капитала) региональное расслоение заметно возрастает. Примерно за 10 лет до конца рассматриваемого периода (в 2040 г. условиями модели предусмотрено улучшение сбалансированности) дифференциация начинает плавно снижаться. Это означает, что накопленная финансовая мощь даёт возможность перераспределить средства в пользу аутсайдеров задолго до 2040 г. и обеспечить заметное сближение соответствующих региональных показателей. В модели сочетание коэффициента вариации и объёма оказываемых бюджетных услуг может быть выражено в Парето-границе решений (рис. 5).

Важное наблюдение: ужесточение требования к сбалансированности показателей бюджетной обеспеченности непременно приводит к сокращению совокупного объёма бюджетных услуг, но

⁴ Под бюджетом СФО здесь понимается интегрированный бюджет, состоящий из совокупности бюджетов субъектов Российской Федерации, входящих в состав СФО (10 субъектов РФ, Указ Президента России № 632 от 3 ноября 2018 г.)

⁵ Расчёты осуществлялись при участии магистранта ЭФ НГУ А.В. Лабунец с использованием программного комплекса IBMCPLEXOptimizationStudio 12.6.

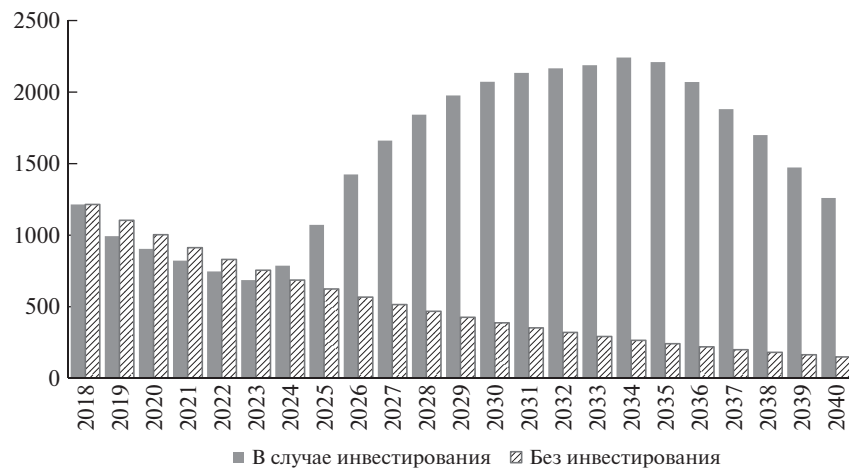


Рис. 2. Объём дисконтированных бюджетных услуг, оказываемых населению СФО в соответствующем году, млрд руб. (по вариантам)

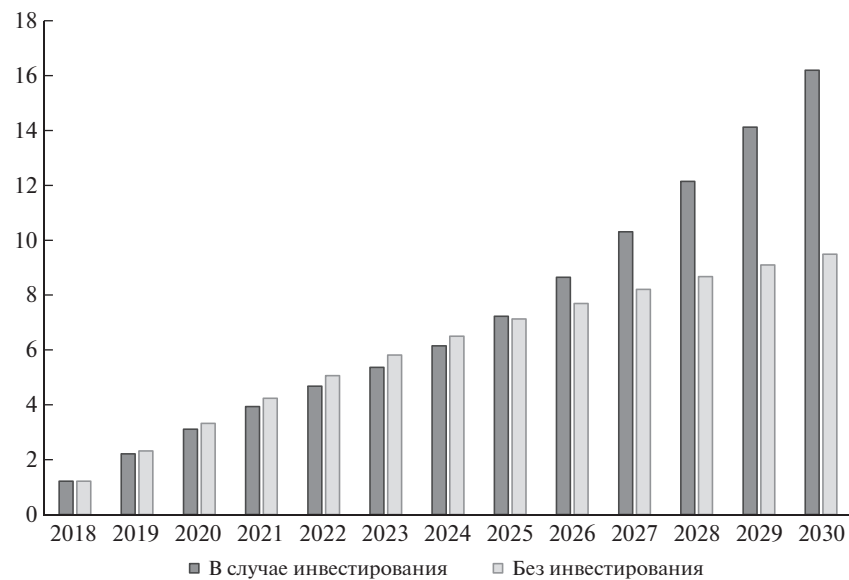


Рис. 3. Объём кумулятивных бюджетных услуг по вариантам (с учётом дисконтирования), трлн руб.

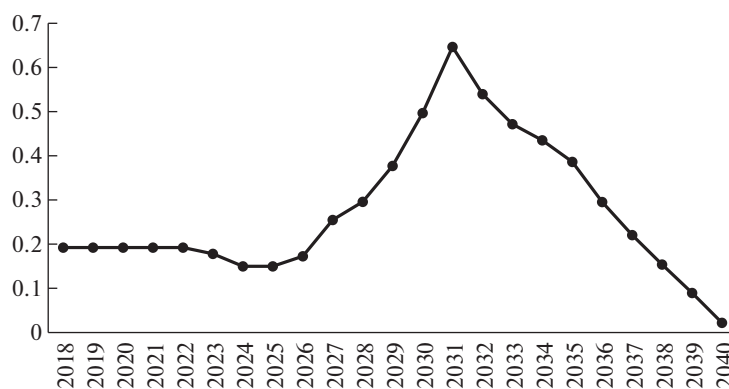


Рис. 4. Коэффициент вариации душевых бюджетных услуг



Рис. 5. Парето-граница выбора между региональной сбалансированностью и ростом бюджетных услуг

весьма слабому. Например, уменьшение сбалансированности к концу периода с 0.1 до 0.2 (то есть изменение коэффициента вариации с 0.9 до 0.8) оборачивается потерей в целевой функции (суммарного объема бюджетных услуг) на 28.4 млрд руб., составляя всего 0.08%.

* * *

Существенное условие быстрого развития ряда российских регионов в последнее десятилетие — заметно более высокое значение нормы накопления, чем средний показатель по России. В тех сравнительно редких случаях, когда региональное значение нормы накопления сопоставимо со средней оценкой, условием преимущественного роста становятся низкие затраты инвестиций на единицу прироста ВРП. Достигнутый в последние годы прогресс, касающийся роста душевого потребления государственных и муниципальных услуг, во многих случаях обеспечивается не только за счёт собственных усилий регионов. Это обстоятельство не может не отражаться на решимости и готовности эти усилия приумножать, наращивать налоговый потенциал.

Из экспериментальных расчётов на базе предлагаемой модели следует, что экономия на удовлетворении текущих потребностей, предполагающая определённые социальные “жертвы” ради накопления основного капитала, может привести к более высокому уровню потребления государственных и муниципальных услуг в будущем при сокращении региональной дифференциации в динамике. Накопленная финансовая мощь открывает широкие возможности для манёвра, межрегионального перераспределения доходов

для достижения заданного уровня сбалансированности.

На основе модельных расчётов определена Парето-граница выбора между региональной сбалансированностью и ростом совокупных бюджетных услуг. Определение конкретных условий (мера экономии текущих затрат, величина дисконта и др.), при которых возможно заинтересовать регионы в развитии собственного налогового потенциала, — предмет дальнейших исследований.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта “Социально-экономическое развитие Азиатской России на основе синергии транспортной доступности, системных знаний о природно-ресурсном потенциале, расширяющегося пространства межрегиональных взаимодействий”. Соглашение с Минобрнауки № 075-15-2020-804.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственное право Германии. В 2 т. / Под ред. Б.Н. Топорнина (отв. ред.), Б.М. Лазарева, Ю.П. Урьяса. М.: ИГПАН, 1994.
2. *Vesper D.* Quo vadis, Länderfinanzausgleich? Wochenbericht 26/2000, DIW.
3. Секреты привлекательности: как 20 регионам удалось совершить инвестпрорыв. <https://iz.ru/975527/anna-kaledina/sekrety-privlekatelnosti-kak-20-regionam-udalos-sovershit-investproryv>
4. *Lavrovskii B.L., Goryushkina E.A.* Characteristic Features of Government Control over Russia's Spatial Development // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017. V. 87. № 4. P. 370–377.
5. *Мельникова Л.В.* Региональная наука и региональная политика // Региональный менеджмент: учебное пособие / Под ред. В.А. Крюкова, Б.Л. Лавровского. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. С. 287–321.
6. World Bank. World Development report 2009. Reshaping economic geography. <http://www.un.org/ru/development/surveys/docs/worlddev2009.pdf>
7. *Лавровский Б.Л.* Измерение региональной асимметрии на примере России // Вопросы экономики. 1999. № 3. С. 42–52.
8. *Лавровский Б.Л.* Экономический рост и региональная асимметрия (эмпирический анализ). Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2005.
9. *Поздняков А., Лавровский Б., Масаков В.* Политика регионального выравнивания в России (основные подходы и принципы) // Вопросы экономики. 2000. № 10. С. 74–91.
10. *Лавров А.М.* Бюджетная реформа в России: От управления затратами к управлению результатами. М.: КомКнига, 2005.

11. От жёлтых морей до пустынного края. Как Компартия Китая удерживает вместе 33 региона. <https://www.kommersant.ru/doc/3629907>
12. Китай оценил долги регионов в \$1.65 трлн. https://www.vedomosti.ru/finance/news/2011/06/27/kitaj_ocenil_dolgi_regionov_v_165_trln
13. Федеральная служба государственной статистики. <https://rosstat.gov.ru>
14. Лавровский Б.Л., Горюшкина Е.А. Бюджетный федерализм в России: быть или не быть? // Вопросы экономики. 2021. № 1. С. 143–160.
15. Губернатор представил стратегию формирования регионального бюджета развития на федеральном уровне. 15 января 2021. <https://www.nso.ru/news/44913>
16. В 2020 году расходы региональных бюджетов увеличились на рекордные 15%. <https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2021/01/17/854371-2020-godu>
17. Задолженность регионов по бюджетным кредитам будет реструктурирована. Минфин России: Пресс-центр. 22.04.2021. https://minfin.gov.ru/ru/press-center/?id_4=37456-zadolzhennost_regionov_po_byudzhetnym_kreditam_budet_restrukturirovana
18. Законопроект “О внесении изменений в Бюджетный Кодекс РФ” принят в первом чтении на заседании Госдумы от 25.05.2021 // Стенограмма заседаний Государственной думы 25 мая 2021 г. (duma.gov.ru)
19. Лавровский Б.Л., Горюшкина Е.А., Шильцин Е.А. Региональные дисбалансы: Россия и Сибирь. Новосибирск, 2010. Стр. 214–239.
20. Лавровский Б.Л., Спиридонова Е.В. Подходы к выравниванию бюджетной обеспеченности: оценка возможностей (опыт моделирования на примере муниципальных образований Новосибирской области) // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер.: Социально-экономические науки. 2013. Т. 13. Вып. 3. С. 67–80.
21. Министерство финансов РФ. https://minfin.gov.ru/ru/performance/regions/mb/mb2022_2024/
22. Федеральное казначейство. <https://roskazna.gov.ru/ispolnenie-byudzhetrov/>

МС2Е – МЕТАОБЛАЧНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СРЕДА ДЛЯ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2022 г. Р. Л. Смелянский

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: smel@cs.msu.ru

Поступила в редакцию 29.06.2021 г.

После доработки 06.07.2021 г.

Принята к публикации 18.08.2021 г.

Метаоблачная вычислительная среда (Meta Cloud Computing Environment – МС2Е) – российско-китайский проект, посвящённый изучению методов и средств построения информационно-вычислительной среды для научных вычислительных экспериментов и междисциплинарных исследований, который завершился в 2020 г. Работы в этой области были сфокусированы на федеративном принципе организации вычислений и управления данными, предусматривающем создание специализированной неоднородной экосистемы из центров обработки данных с виртуализированной инфраструктурой и высокопроизводительных вычислителей, объединённых телекоммуникационными ресурсами – сетью передачи данных. Одна из ключевых проблем построения такой экосистемы, ставшая центральной в проекте МС2Е, – интеграция высокопроизводительных вычислителей и центров обработки данных – облачных вычислительных сред на базе кластеров серверов. В статье представлен краткий обзор основных результатов проекта.

Ключевые слова: высокопроизводительные вычисления, суперкомпьютер, облако, центр обработки данных.

DOI: 10.31857/S086958732201008X

Научные междисциплинарные исследования в различных областях науки предполагают сотрудничество нескольких географически разделённых исследовательских групп, доступ к научным коллекциям данных и высокопроизводительным вычислительным ресурсам, для чего необходима информационная, вычислительная и коммуникационная инфраструктура, учитывающая специфику каждого проекта. Её построение традиционным способом (локальный кластер из серверов, или центр обработки данных – ЦОД со

средствами виртуализации вычислителей¹ и сетью передачи данных) связано с рядом проблем:

- это требует значительных финансовых и материальных вложений и высококвалифицированных IT-специалистов. Проблема усложняется, если в проекте эксперименты ведут независимые исследовательские группы, которые используют разные методы работы, часто имеют разные внутренние бизнес-процессы, аппаратные и программные предпочтения и могут располагаться далеко друг от друга; кроме того, эксперименты в разных предметных областях могут занимать разное время;

- на начальной стадии требования к инфраструктуре проекта известны приблизительно и, как правило, завышены, что ведёт к потере эффективности инвестиций;

- работа усложняется, когда научные данные распределены и используются разными командами одновременно;

¹ Далее локальный кластер из серверов, или ЦОД со средствами виртуализации, будет обозначаться аббревиатурой HPC-C – High Performance Computing Cloud.



СМЕЛЯНСКИЙ Руслан Леонидович – член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой автоматизации систем вычислительных комплексов факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова.

- данные, необходимые одной команде, могут принадлежать другой – без специализированной системы управления инфраструктурой вопросы правообладания данными регулировать сложно;

- разные группы исследователей одного и того же проекта могут использовать разные инструменты, имеющееся программное обеспечение для обработки, сбора и хранения данных. Создание или освоение нового инструментария для них обычно неприемлемо, поэтому необходимо предоставить возможность привносить в информационно-вычислительную среду проекта уже реализованные разработки.

Основным инструментом для численных экспериментов и моделирования всегда были высокопроизводительные вычисления (High Performance Computing – HPC). Вычислительные ресурсы для них предоставляются суперкомпьютерами и специализированными кластерами серверов. Однако анализ данных, представленных на сайте супервычислителей TOP500.org [1], позволяет говорить о том, что количество научных приложений растёт быстрее, чем количество суперкомпьютеров и установок высокопроизводительных вычислений². В то же время мы видим быстрый рост популярности облачных вычислений, использование сетей центров обработки данных (Data Center Network – DCN) для увеличения вычислительной мощности платформ облачных вычислений. Хорошим примером здесь может служить Ассоциация EGI [2].

Суперкомпьютеры (HPC-S) и облачные среды ЦОД, или кластер серверов HPC (HPC-C), обладают разными вычислительными возможностями и отличаются по своей загрузке. Большинство приложений будет работать на суперкомпьютере быстрее, чем на кластере серверов в ЦОД. Однако общее время получения результата вычислительного эксперимента, то есть ожидание в очереди плюс время выполнения на суперкомпьютере HPC-S, может оказаться больше, чем время выполнения плюс время ожидания в очереди в облачной среде на кластере серверов HPC-C. Мы будем называть эту общую задержку временем программы в системе (критерий PTS).

Миссия проекта МС2Е заключалась в том, чтобы исследовать, как должна быть организована среда, которая позволяет создавать эффективную по критерию PTS информационно-вычислительную инфраструктуру, отвечающую перечисленным особенностям конкретного междисциплинарного проекта. Одна из пока малоизученных проблем этой миссии – интеграция двух довольно разных сред высокопроизводительных вычислений – суперкомпьютеров (HPC-S) и облачных

сред (HPC-C), различающихся по многим параметрам: уровню и способам управления ресурсами, технике виртуализации, составу параметров и форме спецификации запроса на выполнение программы, планированию и политике выделения ресурсов. Так, для выделения ресурсов в среде HPC-S характерно использование методов резервирования и изоляции, то есть когда разные вычисления не могут разделять один и тот же физический ресурс. Для сред HPC-C характерно выделение ресурсов по требованию и совместное использование несколькими программами одного и того же физического ресурса. Облачная среда предлагает большую гибкость и удобство для работы с ресурсами по сравнению с HPC-S, предоставляя виртуализированные ресурсы, настроенные для конкретных целей. Перечисленные выше различия платформ HPC-S и HPC-C затрудняют автоматическое переключение задач между ними, если какая-либо из них становится сильно загруженной. Таким образом, чтобы изменить целевую платформу, исследователям необходимо потратить время и ресурсы на настройку своего программного обеспечения.

Ещё одна проблема на пути к интеграции HPC-S и HPC-C заключается в том, как в гетерогенной интегрированной среде из двух платформ правильно выбрать вычислитель для выполнения MPI-программы³, использующей библиотеку MPI (Message Passing Interface), – средство для взаимодействия между параллельными ветками вычислителей одной и той же программы. Другими словами, для каждой MPI-программы, находящейся в очереди, необходимо принять решение, где её выполнение будет более эффективно с точки зрения критерия PTS. Занимаясь проблемой интеграции, необходимо обосновать гипотезу о том, что совместное использование физических ресурсов в среде HPC-C несколькими MPI-программами одновременно сократит общее время их выполнения, то есть это время будет меньше, чем сумма времён последовательного выполнения каждой.

Другая трудность заключается в способности среды агрегировать ресурсы сети передачи данных между ЦОДами в DCN (Data Communication Network). Здесь ключевая проблема состоит в реализации сервиса выделения канала для передачи данных по требованию (Bandwidth on Demand – BoD). Этот сервис должен выделять по запросу каналы между двумя или более ЦОДами с соответствующим качеством, то есть способных передать определённое количество данных за определённый интервал времени через сеть передачи данных, например, Интернет. Следует подчеркнуть, что такой сервис не предполагает наличие

² Далее этот класс высокопроизводительных вычислителей для краткости будем обозначать HPC-S.

³ Далее для краткости вместо MPI-программа будем использовать термин “программа”.

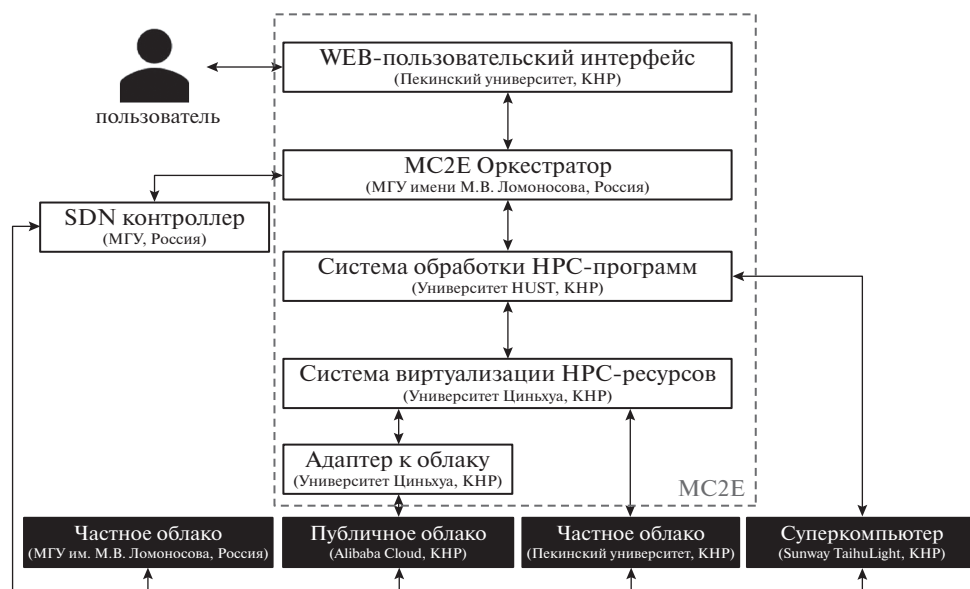


Рис 1. Структура MC2E

выделенного канала между взаимодействующими вычислителями. Более того, он должен создаваться динамически, путём объединения существующих сетевых ресурсов (линии передачи, коммутаторов и т.п.).

После вводных тезисов представим основные результаты проекта MC2E: принципы построения структуры среды MC2E; экспериментальное исследование влияния сети в ЦОД на совместное использование процессоров в облаках и возможность совместного применения этих ресурсов MPI-программами; новые подходы к прогнозированию времени выполнения программ на определённом наборе вычислителей для определения наиболее эффективного места выполнения программы; подходы к реализации сервиса VoD. С подробным отчётом по проекту можно ознакомиться в работе [3].

СТРУКТУРА MC2E

Перечислим основные принципы организации среды MC2E:

- инфраструктура представляет собой объединение локаций, оснащённых вычислителями, хранилищами и сетевыми ресурсами, называемых федератами;
- федерация управляет всеми ресурсами (центральный процессор, память, сеть передачи данных, программное обеспечение), предоставляемыми федератами;
- ресурсы одного федерата могут одновременно использовать разные проекты;
- ресурсы федерата могут быть виртуализированными;

- ресурсы на уровне пользователя имеют высокий уровень абстракции и их использование не должно подразумевать высокую квалификацию пользователя;

- результаты экспериментов всегда должны сохраняться и могут использоваться другими для воспроизведения или продолжения эксперимента;

- федерация предоставляет сервисы по обработке данных, другими словами, федерация — это компьютер.

На рисунке 1 показана организация среды MC2E с распределением ответственности между международными участниками проекта.

Примером вычислительного ресурса федерата может быть высокопроизводительный вычислитель либо ЦОД. У каждого федерата есть своя собственная политика, которая регулирует распределение ресурсов между участниками проектов. Идея построения информационно-вычислительной инфраструктуры как федерации разнородных вычислительных установок уже использовалась во многих действующих проектах. Некоторые из них предназначались для проведения экспериментов в области компьютерных сетей. Например, проект GENI — Global Environment for Network Innovation [4], инициированный Национальным научным фондом США (NSF), представляет собой виртуальную лабораторию для сетевых экспериментов в международном масштабе. Сегодня более 200 университетов США подключены к среде GENI. Другой поддерживаемый NSF проект — FABRIC [5] — предлагает адаптивную программируемую инфраструктуру для исследований в области компьютерных наук. К аналогич-

ным, но менее известным проектам относятся Ophelia [6] и Fed4Fire [7]. Первый реализован при поддержке ЕС, второй поддержан 17 компаниями из 8 европейских стран. Есть и другие, которые обеспечивают среду для вычислительных экспериментов независимо от прикладной области [8–10]. Однако у всех этих проектов есть несколько существенных недостатков:

- слабая интеграция между HPC-S и HPC-C, не позволяющая автоматически выбирать эффективный вычислительный ресурс;
- невозможность строить цепочки сервисов для проведения экспериментов;
- нельзя автоматически переносить уже существующее программное обеспечение в новую среду;
- при планировании ресурсов не учитывается масштабирование производительности сервисов;
- отсутствие служб контроля и управления DCN, таких как мониторинг и службы BoD.

Базовыми технологиями для проекта MC2E при разработке виртуальной инфраструктуры для междисциплинарных исследований служили программно-конфигурируемые сети (SDN) и виртуализация сетевых функций (NFV) [11]. Эти технологии позволяют повысить уровень абстракции ресурсов, обеспечить их согласованную оптимизацию и автоматизацию управления инфраструктурой. Вместо отдельных ресурсов пользователи получают виртуальные инфраструктуры, полностью укомплектованные необходимыми ресурсами – вычислительными мощностями, каналами связи и системами хранения – с гарантированной производительностью и качеством обслуживания (QoS) на основе соглашения об уровне сервиса (SLA).

Фактически, в проекте MC2E использовались две облачные среды: Docklet [12] и Cloud Conductor (C2) [13]. Предназначение Docklet – предоставить индивидуально настроенное рабочее пространство в облачной среде [14]. Основа Docklet – LXC виртуальный кластер [15]. Пользователи Docklet взаимодействуют непосредственно в своей рабочей области, используя браузер для разработки, отладки, тестирования своего программного обеспечения с помощью инструментов, которые предоставляет эта среда. Docklet позволяет строить индивидуальные небольшие виртуальные центры обработки данных, создавая виртуализированные кластеры, а затем предоставляя экспериментаторам настроенное рабочее пространство в облаке. Пользователям нужен только современный браузер для доступа в свою рабочую область, расположенную в сети федерата, из любого места в Интернете и в любое время.

Архитектура платформы C2 основана на эталонной реализации модели ETSI NFV MANO [13]. C2 обеспечивает полную поддержку жизнен-

ного цикла виртуализированных сервисов (ВС) – инициализацию, конфигурацию, выполнение и деинициализацию, которая осуществляется с помощью так называемых шаблонов на языке TOSCA [13]. Всё, что нужно для установки и запуска ВС, – шаблон TOSCA, включающий описание структуры облачного приложения, политики управления приложениями, образа операционной системы и сценариев запуска, остановки и настройки приложения, реализующего ВС. TOSCA формирует администратор сервиса в виде архива zip или tar.

Такая среда, построенная на основе федерации, имеет следующие преимущества:

- простота и скорость выделения, настройки и масштабирования ресурсов;
 - разработка приложения как цепочки из сервисов на основе технологии NFV;
 - объединение инфраструктур разных исследовательских групп на основе единой политики доступа;
 - автоматизированное планирование ресурсов для выполнения запросов пользователей на основе политики доступа и требований SLA;
 - язык шаблонов для описания приложений, позволяющий абстрагироваться от низкоуровневых системных деталей;
 - децентрализованная система учёта ресурсов для взаиморасчётов между участниками проекта;
 - широкие возможности для отслеживания и мониторинга экспериментов;
 - повышенная эффективность виртуализации сети благодаря технологии программно-конфигурируемых сетей (ПКС), что позволяет настраивать виртуализированные сетевые каналы для каждого конкретного эксперимента;
 - общий язык спецификаций, необходимый для переноса существующего исследовательского программного обеспечения (ПО) в среду MC2E.
- Перечислим основные компоненты или подсистемы среды MC2E:
- мета-облако – оркестровка пользовательских приложений, распределение и планирование их между федератами;
 - интерфейс – предоставляет пользователям унифицированный API для отправки своих приложений и федеративного администратора с целью управления и контроля ресурсов федерации;
 - сеть – регулирует использование сетевых ресурсов и предоставляет услугу BoD;
 - монитор – выполняет мониторинг и учёт потребления ресурсов всех федератов в MC2E;
 - качество обслуживания, административный контроль и управление – обеспечивают соблюдение политики использования ресурсов на основе

требований пользователя (SLA) и гарантируют доступность ресурсов.

Эти компоненты подробно описаны в работе [16]. Общий процесс выполнения запроса пользователя в среде MC2E выглядит следующим образом:

1. С помощью единого интерфейса MC2E пользователь отправляет своё приложение и данные на интерфейсный сервер.

2. Интерфейсный сервер вызывает планировщик и монитор мета-облака, чтобы выбрать федерата для выполнения приложения.

3. Мета-облако анализирует очередь и прогнозирует время выполнения приложения и время передачи данных для всех доступных федератов.

4. Основываясь на прогнозе, мета-облако выбирает федерата, который минимизирует общее время пребывания приложения в системе (критерий PTS – время ожидания в очереди + время выполнения).

5. Мета-облако обращается к контуру управления сетью для прокладки канала к выбранному на шаге 4 федерату и отправляет туда приложение и его данные.

6. Федерат запускает приложение и возвращает результаты пользователю.

7. В случае сбоя подсистема мониторинга и управления качеством обслуживания перенаправляет приложение средствами мета-облака в другой федерат.

ОБЛАКО КАК СРЕДА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Несмотря на то, что скорость вычисления в облачных средах ниже, чем в специализированных серверных кластерах или суперкомпьютерах [17], такая технология становится всё более популярной и выбирается в качестве платформы для высокопроизводительных вычислений из-за низкой стоимости и простоты доступа. В нескольких статьях [18, 19] показано, что одно из основных узких мест производительности НРС-С связано с задержками в сети передачи данных (СПД) в ЦОД. Суперкомпьютеры используют быстрые СПД-сети на основе специализированных средств [20, 21]. НРС-С в основном полагаются на обычный Ethernet. Задержки в СПД могут привести к недогрузке процессоров (ЦП) приложениями с высокой интенсивностью обмена данными, поскольку в них могут возникать длительные “паузы” в вычислениях из-за ожидания передачи данных по сети между ветвями приложения.

Один из важных результатов проекта MC2E – экспериментальное обоснование гипотезы о том, что производительность НРС-приложений может незначительно деградировать при совмест-

ном использовании ядер ЦП. Эта гипотеза была проверена в рамках проекта MC2E с помощью теста НРС – NAS Parallel Benchmarks (NPB) [22] в облачной среде мини-ЦОД с гипервизором QEMU/KVM с 64 виртуальными машинами (ВМ) (Ubuntu 16.04, 1 vCPU, 1024 Мб ОЗУ), MPI версия 3.2. На головном сервере было 16 МВ, на остальных – по 8 МВ на каждом. Средняя задержка между разными виртуальными машинами – около 400 мкс. Пропускная способность составляла на одном сервере 18.2 Гб/с, на разных серверах – 5.86 Гб/с.

Для изучения влияния пропускной способности сети на загрузку ЦП была проведена серия экспериментов. Последовательно 5 NPB MPI-программ с 2, 4, 8, 16, 32, 64 процессами на каждой виртуальной машине запускались в сети с тремя пропускными способностями каналов: 100 Мб/с, 1 и 10 Гб/с соответственно. Эксперименты показали почти линейную зависимость деградации загрузки ЦП от роста числа MPI-процессов. Это происходило потому, что разные MPI-процессы выполнялись на разных ВМ, а данные передавались между разными серверами. Загрузка ЦП также снижалась, когда программа выполнялась на одном физическом сервере (2, 4 и 8 ЦП). Сокращение загрузки ЦП как раз и позволяет использовать ядра одного и того же ЦП между разными программами. Подробно эта серия экспериментов с графиками представлена в работе [16].

В другой серии экспериментов изучалась способность различных НРС-приложений совместно использовать ядра одного и того же ЦП. Методология эксперимента заключалась в следующем: последовательно запускались 5 пар идентичных NPB MPI-программ с одинаковым числом (2, 4, 8, 16, 32, 64) процессов в каждой. Для оценки способности программы совместно использовать ресурсы ЦП применялась метрика:

$$Queue\ metric = \frac{T_{pure}^1 + T_{pure}^2}{\max(T_{sharing}^1, T_{sharing}^2)},$$

где T_{pure}^i ($i = 1, 2$) – время выполнения без разделения ресурсов; $T_{sharing}^i$ ($i = 1, 2$) – время выполнения, когда две программы использовали одни и те же ядра одного и того же ЦП.

Нетрудно увидеть, что если значение метрики больше 1, то выполнение двух программ, запускаемых одновременно, займёт меньше времени, чем при их последовательном запуске. Эксперименты показали, что даже в среде с медленной сетью (100 Мб/с) можно получить до 20% ускорения выполнения. Однако не все программы могут эффективно разделять физические ресурсы. Подробно эта серия экспериментов описана в работе [16].

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММ

Напомним, что один из основных критериев эффективности среды облачных вычислений для НРС-приложений — время, проведённое программой в этой среде (критерий PTS). Данная величина зависит от алгоритмов распределения ресурсов в облачной среде (отображение виртуальных вычислителей на физические) и дисциплины обслуживания очереди программ с учётом неоднородности физических вычислителей.

Из анализа процесса выполнения запроса пользователя, представленного в конце раздела “Структура МС2Е”, видно, что этапы 3 (метапланирование) и 4 (локальное планирование) — точки оптимизации по критерию PTS. Важной частью проекта МС2Е стали исследование и разработка алгоритма, выбор наиболее эффективного вычислителя в федерации для определённой программы на основе критерия минимального времени выполнения — важного компонента критерия PTS. Для этого специалисты изучили и разработали несколько алгоритмов прогнозирования времени выполнения программы на определённом наборе вычислителей с учётом истории выполнения программы на разных вычислителях (подробное описание алгоритмов см. [23]).

Задача прогнозирования времени выполнения программы на определённом вычислителе хорошо известна и относится к классическим. Например, время выполнения программы на конкретном вычислителе, а также время ожидания в очереди можно спрогнозировать, имея историю её запусков на этом вычислителе [24–27], для чего могут быть использованы многие алгоритмы экстраполяции, например [28, 29] или регрессии [30], или более сложные алгоритмы, в частности, ансамбль деревьев принятия решений (рандомный лес) [31]. Основным недостатком этих алгоритмов заключается в том, что их можно применять только к одному и тому же вычислителю. Но суть этой задачи в МС2Е заключалась в прогнозировании времени выполнения программы на определённом наборе вычислителей. Конечно, упомянутые алгоритмы можно использовать для оценки времени выполнения программ на нескольких вычислителях. Однако для этого нужна история запуска каждой программы на каждом вычислителе из набора. Эта информация недоступна.

Выбор вычислителя осуществляется следующим образом. Одним из хорошо известных алгоритмов [24–27] оценивается время выполнения программы по историям её проведения на каждом вычислителе из определённого набора. Примером такой истории может быть трасса выполнения программы [32]. Основываясь на полученных данных, можно либо построить расписание для группы программ, либо, следуя жадной стра-

тегии, отправлять каждую программу на вычислитель, где у неё минимальное время выполнения. Однако необходимы все истории выполнения всех программ на каждом из вычислителей в рассматриваемом наборе. Такой информации, как правило, нет.

Один из важных и новых результатов проекта МС2Е — разработка метода прогнозирования времени выполнения программы, который позволяет ослабить требование данных обо всех историях выполнения всех программ на каждом из вычислителей в рассматриваемом наборе: для прогнозирования времени выполнения программы на вычислителях из определённого набора достаточно только историй выполнения этой программы на некоторых из них (подробное описание метода см. [23]). Другими словами, нет необходимости запускать каждую программу на каждом вычислителе.

Основная идея нового подхода к задаче прогнозирования времени выполнения программы заключалась в том, что рассматриваемая проблема очень похожа на решаемую в системах рекомендаций, или рекомендательных системах (РС) [33]. РС относится к подклассам системы фильтрации информации, стремящейся предсказать рейтинг или предпочтение пользователя некоторого объекта [34]. Примерами такого объекта могут быть фильмы, книги или любые другие товары. Таким образом, рекомендательная система восстанавливает, прогнозирует отношения между пользователями и товарами на основе отдельных пользовательских оценок предпочтения.

У РС есть рейтинговая матрица, в которой строки (или столбцы) соответствуют фильмам, книгам или товарам, а столбцы (или строки) соответствуют пользователям. Эта матрица часто бывает разреженной, поскольку в списке присутствует множество пользователей и элементов, поскольку пользователи не могут физически оценить все рассматриваемые элементы. Система пытается предсказать предпочтения каждого пользователя для каждого элемента на основе индивидуальных оценок пользователей для некоторых элементов. Другими словами, РС должна заполнить пустые ячейки в рейтинговой матрице. В этих терминах рассмотрим следующую аналогию: пользователи — это вычислители, элементы — это программы, а оценки пользователей — времена выполнения программ. Таким образом, вычислители “оценивают” программы, при этом чем меньше рейтинг (время выполнения), тем лучше.

В результате задача прогнозирования времени выполнения программы была сведена к задаче заполнения пустых ячеек в матрице “Программы—Вычислители”, построенной для заданного набора программ и заданного набора вычислителей. В ячейках этой матрицы указано время выполне-

ния конкретной программы с конкретными наборами данных, соответствующих конкретному вычислителю.

Должно быть ясно, что точность прогноза зависит от количества известных историй выполнения программ на вычислителе из определённого набора. Нами было исследовано два подхода к этой задаче. Первый базировался на группировке вычислителей на основе корреляции Пирсона [35] и показал [23], что данный подход целесообразно применять в случае плотно заполненной (не менее 95% ячеек) матрицы “Программы—Вычислители”.

Второй подход, разработанный для разреженной матрицы “Программы—Вычислители”, подразумевал её разложение на векторные представления вычислителей и программ — так называемые *embedding*’и. *Embedding* — это элементы относительно малоразмерного пространства, в которое можно преобразовывать векторы большей размерности. Техника *embedding* упрощает машинное обучение для случая больших данных, таких как разреженные векторы, представляющие слова. В идеале она частично отражает семантику данных, помещая семантически похожие объекты близко друг к другу в пространстве *embedding*’ов [36]. В статье [23] подробно показано, как использовать *embedding* программ и *embedding* вычислителей для прогнозирования времени выполнения программы на конкретном вычислителе. Техника декомпозиции матрицы “Программы—Вычислители” для расчёта *embedding* дана в работе [37].

Предложенный подход к прогнозированию времени выполнения программы требует минимальных знаний о программе, которые обычно собирают на всех современных вычислителях. Другое важное преимущество подхода — возможность декомпозиции матрицы “Программы—Вычислители” на *embedding* и для программ, и для вычислителей размерности 1. Этот факт позволяет тотально упорядочить как вычислители, так и программы, что существенно упрощает подбор вычислителя с эффективным временем выполнения. Подробнее о тестировании методов прогнозирования см. [23].

СЕРВИС “КАНАЛ ПО ТРЕБОВАНИЮ” (BoD)

Как было отмечено в начале статьи, одной из исследованных в проекте МС2Е была проблема динамического создания канала между ЦОДами по требованию с заданным качеством связи. Среда, предназначенная для междисциплинарных научных исследований, должна иметь гибкие и мощные механизмы распределения, планирования и администрирования сетевых ресурсов. В противном случае накладные расходы на сетевые

ресурсы в сети ЦОДов будут очень высокими, так как нагрузка на этот ресурс носит спорадический характер. Естественно, возникал вопрос о возможности создания сервиса BoD, способного формировать между ЦОДами канал надлежащего качества по требованию, то есть передавать определённое количество данных за определённый интервал времени через транспортную сеть TCP/IP. Следует подчеркнуть, что такой сервис не предполагает выделенного канала между взаимодействующими сторонами. Более того, он должен создаваться динамически путём агрегирования существующих сетевых ресурсов.

В статье [38] подробно рассмотрены протоколы агрегации сетевых ресурсов и алгоритмы для создания сервиса BoD. Здесь представлена лишь логическая схема подхода, предложенного в цитируемой статье. Создание сервиса BoD можно разделить на две основные части: идентификация и агрегация маршрутов в сети ЦОДов и распределение потоков данных между ними согласно требованиям качества сервиса BoD для каждого потока.

Слова “построение и агрегация маршрутов” означают, что для передачи потока данных между ЦОДами одновременно используют разные маршруты и агрегируют несколько физических линий в одну логическую. Есть много протоколов и технологий, которые позволяют сделать это [38]. Однако все они оставляют открытой проблему качества обслуживания.

Для построения маршрутов необходимо решить несколько задач.

Первая: сколько и какие маршруты необходимы, чтобы удовлетворить требования качества сервиса BoD? Маршруты должны иметь минимальные пересечения по линиям связи и коммутаторам/маршрутизаторам. Это ограничение проистекает из особенностей работы алгоритмов управления перегрузкой на транспортном уровне в сети. Количество рёберно-непересекающихся путей между двумя вершинами в графе определяется теоремой Менгера [39], которая утверждает, что наибольшее количество непересекающихся по рёбрам маршрутов от вершины u к вершине v в графе равно наименьшему количеству рёбер в разрезе $\langle u, v \rangle$ этого графа.

Отсутствие пересечения маршрутов не всегда относится к критическим моментам. Например, если физическая линия на пересечении имеет достаточную пропускную способность, чтобы удовлетворить требованиям качества сервиса для всех проходящих через неё потоков, то эта линия, будучи пересечением маршрутов, критическим местом не является. Возможно, что в топологии сети нет альтернативных непересекающихся маршрутов между источником и пунктом назначения. Однако при наличии физических каналов

с высокой пропускной способностью можно преобразовать граф топологии сети так, чтобы ребро, соответствующее такой линии, было заменено несколькими рёбрами с меньшей пропускной способностью. Альтернативным решением может быть поиск маршрутов с наименьшим количеством пересечений, как это делает алгоритм Min Cost Max Flow – MCMF [40].

После нахождения значения k – количества непересекающихся маршрутов, граф топологии сети обрабатывают специальным алгоритмом для определения k -маршрутов между источником и пунктом назначения. Оказалось, что для этого подходит далеко не каждый алгоритм. Например, жадный алгоритм [41] не решит эту проблему. Правильным выбором оказался алгоритм MCMF [42]. Он сводит исходную задачу к поиску максимального потока в сети. В результате набор маршрутов с ресурсами, достаточными для предоставления сервиса VoD, будет идентифицирован.

Вторая задача: как распределить ресурсы этих маршрутов при передаче прикладного потока, то есть как решить проблему AFLD (Applicaton Flow Load Distribution)? Она была разделена на три части: оценка ресурсов, распределение ресурсов и реализация рассчитанного распределения между найденными маршрутами. Решение первой даёт ответ на вопрос, достаточно ли доступной пропускной способности идентифицированных маршрутов для обеспечения нужного качества сервиса VoD? Если это так, то решение второй части проблемы даёт ответ на вопрос, как распределить нагрузку потока данных приложения между этими маршрутами. При решении третьей части приходится иметь дело с многопоточными протоколами, то есть использующими несколько маршрутов одновременно. Эти протоколы разделяют прикладной поток на несколько транспортных подпотоков, каждый из которых использует свой маршрут.

Существуют два основных подхода к многопоточной маршрутизации на транспортном уровне: статический и динамический. МРТСР – это статический подход [42], предполагающий априорное выделение определённого количества транспортных подпотоков (то есть маршрутов), между которыми распределяются сегменты прикладного потока. Динамический подход, например FDMP [43], использует динамическое выделение маршрута для подпотока по запросу транспортного агента в зависимости от соответствия общей пропускной способности текущего множества подпотоков требованию качества сервиса.

Для решения AFLD-проблемы была разработана математическая модель многопоточной передачи данных по требованию между ЦОДами при следующих предположениях:

- чтобы воспользоваться сервисом VoD, пара ЦОДов должна заключить контракт с оператором сети передачи данных, к которой подключены ЦОДы, где оговариваются максимально допустимые объёмы передаваемых данных и максимально допустимое для этого время, качество связи и т.д.;
- по одному и тому же контракту невозможно одновременное появление двух и более запросов на сервис VoD;
- вероятность распределения потоков запросов на сервис по каждому контракту известна.

На основе этой модели проблема AFLD была сформулирована как задача целочисленного линейного программирования (ЦЛП) с дискретным временем [16]. Её решение в форме ЦЛП дало ответы на следующие вопросы: достаточно ли имеющейся пропускной способности на выявленных маршрутах для удовлетворения всех потоков запросов при заданном наборе контрактов на определённом интервале времени? Как должна быть распределена пропускная способность на каждом маршруте между потоками, возникающими по требованию?

На базе маршрутизаторов Juniper VMX был построен прототип предложенных выше подходов к реализации сервиса VoD на основе технологии VPN, апробированный между ЦОДами на факультете вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова и ЦОДами Пекинского университета [3]. В апреле 2021 г. успешно завершился пилотный проект реализации сервиса VoD между ЦОДами в Москве и Новосибирске [44].

* * *

Международный проект МС2Е нацелен на исследование методов построения среды для академических междисциплинарных исследований. МС2Е-среда была построена как федерация локальных вычислительных сред, называемых федератами. Каждый федерат представляет собой высокопроизводительный кластер – либо ЦОД, либо суперкомпьютер. К преимуществам предложенного метода можно отнести:

- высокий уровень управления ресурсами и гибкие возможности для определения виртуальных сред;
- возможность использовать имеющееся программное обеспечение исследователей;
- высокое качество планирования и эффективность использования ресурсов по критерию PST;
- освобождение пользователя от рутинных задач системного администрирования, а также определение единого способа описания жизнен-

ного цикла виртуализированного сервиса в ЦОД (или в НРС-кластере).

В ходе проекта экспериментально обоснована гипотеза о том, что можно получить сокращение среднего времени выполнения программ в облаке. Эксперименты продемонстрировали, что на определённых классах приложений можно получить до 20% сокращения времени.

Разработано новое решение проблемы выбора подходящего вычислителя MPI-программы в гетерогенной среде на основе критерия PST. Для этого был предложен новый подход к прогнозированию времени выполнения программы MPI на вычислителе, даже если она на нём никогда не выполнялась. Построены и проанализированы два алгоритма: базирующийся на группировке вычислителей с использованием корреляции Пирсона (для плотной матрицы “Программа—Вычислитель”) и основанный на технике разложения такой матрицы, позволяющий получать векторные представления (embedding) программы и вычислителя (для разреженной матрицы “Программа—Вычислитель”).

Следует подчеркнуть, что предложенный подход к прогнозированию времени выполнения программы требует минимального набора данных об истории выполнения программ, который обычно доступен. Другое его важное преимущество заключается в том, что в результате матричной декомпозиции embedding предоставляется и для программ, и для вычислителей размерности 1. Этот факт позволяет установить тотальное упорядочение как на заданном множестве вычислителей, так и на заданном наборе программ, что существенно упрощает выбор вычислителя с эффективным временем выполнения. В качестве гипотезы в проекте сформулировано предположение, что данный метод прогнозирования времени выполнения может быть применён не только к MPI-программам.

Кроме того, в ходе проекта MC2E предложено и исследовано решение для построения сервиса VoD. Этот подход разделён на проблемы агрегации маршрутов и распределения прикладных потоков. Изучены разные варианты решения задачи агрегации маршрутов в зависимости от топологии сети и возможностей сетевого оборудования. Вопрос о распределении прикладных потоков между агрегированными маршрутами сформулирован и решён в виде задач ЦЛП.

Было бы наивно полагать, что представленные результаты полностью охватывают все проблемы, возникающие при создании информационно-вычислительных сред для междисциплинарных исследований. Перечислим лишь несколько из оставшихся за рамками проекта MC2E: автоматизация запуска программ на различных вычислителях в среде, где есть ресурсы НРС-С и НРС-S;

скоординированное управление данными и сетевыми ресурсами в реальном времени; мониторинг и аналитика, администрирование и безопасность в таких средах [45]; учёт потребляемых ресурсов; взаиморасчёты между участниками федерации; использование технологий периферийных вычислителей [46].

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает огромную благодарность всем участникам совместной работы в проекте MC2E: заведующему лабораторией, старшему научному сотруднику Виталию Антоненко, ведущему научному сотруднику Анатолию Бахмунову, аспирантам Ивану Петрову, Андрею Чупахину и Алексею Колосову, магистранту Глебу Ишелеву (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия); профессору (главному исследователю) Сянцзюнь Чен, профессору Чен Мин, профессору-исследователю Дунган Цао, докторанту Цзюньмин Ма (Пекинский университет, Китай); исследователю Вэньлай Чжао (Университет Цинхуа, Китай); профессору Мин Чен (Хуачжунский университет науки и технологий, Китай).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнялась при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования России № 05.613.21.0088 (уникальный идентификатор RFME-FI61318X0088) и Национальной ключевой программы исследований и разработок Китая (2017YFE0123600).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Meuer H. et al.* The Top500 project. 2019. <http://www.top500.org/>
2. *Kranzlmüller D., de Lucas J.M., Öster P.* The European grid initiative (EGI) // Remote instrumentation and virtual laboratories. Boston, MA, USA: Springer, 2010. P. 61–66.
3. Отчёт НИР “Исследование и разработка метаоблачной вычислительной среды”. Регистрационный номер AAAA-A19-119011190172-9. <https://rosrid.ru>
4. *Hwang T.* NSF GENI cloud enabled architecture for distributed scientific computing // 2017 IEEE Aerospace Conference. March 4–11, 2017, Big Sky, MT, US. IEEE. P. 1–8.
5. *Baldin I.N., Griffioen A., Monga J. et al.* FABRIC: A National-Scale Programmable Experimental Network Infrastructure // IEEE Internet Computing. 2019. V. 23. № 6. P. 38–47.
6. *Dewar R.G., MacKinnon L.M., Pooley R.J. et al.* The OPHELIA Project: Supporting Software Development in a Distributed Environment // ICWI. P. 568–571.
7. Fed4Fire project. 2019. <https://www.fed4fire.eu/the-project/>
8. *Grossman R.L., Gu Y., Mambretti J. et al.* An overview of the open science data cloud // Proceedings of the

- 19th ACM International Symposium on High Performance Distributed Computing. ACM. P. 377–384.
9. *Bal H.E., Bhoedjang R., Hofman R. et al.* Performance evaluation of the Orca shared-object system // ACM Transactions on Computer Systems (TOCS). 1998. V. 16. № 1. P. 1–40.
10. *Brun R., Urban L., Carminati F. et al.* GEANT: detector description and simulation tool // CERN Program Library Long Writeup W5013, 1993.
11. *Смелянский Р.Л., Антоненко В.А.* Концепции программного управления и виртуализации сетевых сервисов в современных сетях передачи данных. М.: Курск, 2020.
12. *Cao D.-G., An B., Shi P.-C., Wang H.-M.* Providing Virtual Cloud for Special Purposes on Demand in Joint-Cloud Computing Environment // Journal of Computer Science and Technology. 2017. V. 32. № 2. P. 211–218.
13. *Antonenko V., Smeliarsky R., Ermilov A. et al.* C2: General Purpose Cloud Platform with NFV Life-cycle Management // 2017 IEEE 9th International Conference on Cloud Computing Technology and Science. December 11–14, 2017, Hong Kong, China. IEEE. P. 353–356.
14. *An B., Shan X., Cui Z. et al.* Workspace as a Service: an Online Working Environment for Private Cloud // 2017 IEEE Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE). April 6–9, 2017, San Francisco, CA, USA. IEEE. P. 19–27.
15. *Cao D.-G., Liu P., Cui W. et al.* Cluster as a Service: a Resource Sharing Approach for Private Cloud // Tsinghua Science and Technology. 2016. V. 21. № 6. P. 610–619.
16. *Antonenko V., Chupakhin A., Kolosov A. et al.* On HPC & Cloud Environments Integration // Performance Evaluation Models for Distributed Service Networks / Ed. by G. Bocewicz, J. Pemoera, V. Toporkov. Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 159–185.
17. *Netto M.A., Calheiros R.N., Rodrigues E.R. et al.* HPC cloud for scientific and business applications: Taxonomy, vision, and research challenges // ACM Computing Surveys (CSUR). 2018. V. 51. № 1. P. 8.
18. *Gupta A., Faraboschi P., Gioachin F. et al.* Evaluating and improving the performance and scheduling of HPC applications in cloud // IEEE Transactions on Cloud Computing. 2016. V. 4. № 3. P. 307–321.
19. *Gupta A., Milojevic D.* Evaluation of HPC applications on cloud // Sixth Open Cirrus Summit. October 12–13, 2011, Atlanta, GA, USA. P. 22–26.
20. Infiniband in supercomputer systems. <https://www.businesswire.com/news/home/2018112005379/en/Mellanox-InfiniBand-Ethernet-Solutions-Accelerate-Majority-TOP500>
21. Gigabit Ethernet in supercomputer systems. <https://www.mellanox.com/solutions/high-performance-computing/top500.php>
22. NAS Parallel Benchmarks. <https://www.nas.nasa.gov/publications/npb.html>
23. *Chupakhin A., Kolosov A., Bahmurov A. et al.* Application of recommender systems approaches to the MPI program execution time prediction // IEEE Proceedings of 3rd International Conference “Modern Network Technologies-2020” (MoNeTec-2020). October 27–29, 2020, Moscow, Russia.
24. *Gibbons R.* A historical application profiler for use by parallel schedulers // Proceedings of the Job Scheduling Strategies for Parallel Processing. Springer, 1997.
25. *Kapadia N.H., Fortes J.A., Brodley C.E.* Predictive application performance modeling in a computational grid environment // Proceedings of the Eighth International Symposium on High Performance Distributed Computing. IEEE. 1999. P. 47–54.
26. *Li H., Groep D., Templon J., Wolters L.* Predicting job start times on clusters // CCGRID '04: Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid. 2004. P. 301–308.
27. *Mohr B., Wolf F.* Kojak – a tool set for automatic performance analysis of parallel programs // Euro-Par 2003 Parallel Processing. Springer, 2003. P. 1301–1304.
28. *Iverson M.A., Özgüner F., Potter L.* Statistical prediction of task execution times through analytic benchmarking for scheduling in a heterogeneous environment // IEEE Trans. Comput. 1999. V. 48. № 12. P. 1374–1379.
29. *Liu X., Chen J., Liu K., Yang Y.* Forecasting duration intervals of scientific workflow activities based on time-series patterns // Proceedings of the IEEE Fourth International Conference on eScience. 2008. P. 23–30.
30. Ridge Regression. https://ncss-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/themes/ncss/pdf/Procedures/NCSS/Ridge_Regression.pdf (accessed 21 Jun 2020).
31. Random forest algorithm. https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc_home.htm (accessed 21 Jun 2020).
32. *Smeliarsky R.L.* Model of distributed computing system operation with // Programming and Computer Software. 2013. V. 39. № 5. P. 223–241.
33. <https://www.coursera.org/specializations/recommender-systems>
34. https://en.wikipedia.org/wiki/Recommender_system#:~:text=A%20recommender%20system%2C%20or%20a,would%20give%20to%20an%20item
35. Pearson's Correlation Coefficient. https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-1-4020-5614-7_2569 (accessed 21 Jun 2020).
36. <https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/embeddings/video-lecture>
37. *Cheng C.M., Jin X.Q.* Matrix Decomposition // Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining / Ed. by R. Alhajj, J. Rokne. NY: Springer, 2018.
38. *Stepanov E.P., Smeliarsky R.L.* On bandwidth on demand problem // Proceedings of the 27th International Symposium Nuclear Electronics and Computing (NEC'2019). 30 September – 4 October 2019. CEUR-WS Budva, Montenegro. V. 2507. P. 402–407.
39. *Thomas B., Göring F., Harant J.* Menger's theorem // Journal of Graph Theory. 2001. V. 37. № 4. P. 35–36.
40. *Stepanov E., Smeliarsky R.* On Analysis of Traffic Flow Demultiplexing Effectiveness // 2018 International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTec). IEEE, 2018.

41. *Kukreja N., Maier G., Alvizu R., Pattavina A.* SDN based automated testbed for evaluating multipath TCP // IEEE International Conference on Communication, ICC 2015. June 8–12, 2015, London, UK. Workshop Proceedings. 2016. P. 718–723.
42. *Raiciu C., Paasch C., Barre S. et al.* How hard can it be? Designing and implementing a deployable multipath ECP // Presented as part of the 9th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI-12). April 25–27, 2012, San Jose, CA. USENIX. P. 399–412.
43. *Chemeritskiy E., Stepanov E., Smelyansky R.* Managing network resources with flow (de) multiplexing protocol // Mathematical and Computational Methods in Electrical Engineering. 2015. V. 53. P. 35–43.
44. Демонстрация приложения Bandwidth on Demand на базе контроллера RunOS.
<https://youtu.be/XjggLW1LKkg>
45. *Burke J.* What is the role of machine learning in networking? <https://searchnetworking.techtarget.com/answer/What-is-the-role-of-machine-learning-in-networking>
46. *Smelyansky R.* Hierarchical edge computing // International conference proceedings “Modern Network Technologies”, MoNeTec-2018. M., 2018. P. 97–105.

ОСНОВНЫЕ СТАТИСТИЧЕСКО-КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАТАЛОГА GAIA EDR3

© 2022 г. А. С. Цветков

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a.s.tsvetkov@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.08.2021 г.

После доработки 02.09.2021 г.

Принята к публикации 23.09.2021 г.

В недавнем выпуске журнала “Вестник РАН” (№ 2, 2021) в статье “Достижения космической астрометрии” речь шла о развитии астрометрии от древнейших времён до космического проекта Gaia. В представленной работе, продолжающей эту тему, детально разбираются свойства последнего релиза звёздного каталога Gaia EDR3, содержащего 1.8 млрд объектов. Обсуждаются способы обработки его данных на персональных компьютерах, доступных большинству пользователей. Проведено подробное статистическое исследование каталога, получены распределения звёзд по небесной сфере, что даёт возможность оценить объём и качество материала. Сделан анализ трёхполосной фотометрии каталога, построены распределения показателей цвета, диаграммы Герцшпрунга–Рессела.

Ключевые слова: астрометрия, Gaia, космическая астрометрия, звёздная кинематика.

DOI: 10.31857/S0869587322010108

Космический аппарат Gaia ещё работает на орбите, финальный каталог планируется к выпуску в первой половине 2022 г. [1]. Уже изданы предварительные каталоги — так называемые Data Release DR1 и DR2. 3 декабря 2020 г. вышел в свет Gaia Early Data Release 3 [2] — “ранний релиз финального каталога” [2]. Методика его построения и детали подробно изложены в работе [3]. Этим данным посвящено такое количество публикаций, что даже краткое перечисление их названий не представляется возможным. Консорциум Gaia имеет доступ к огромным вычислительным ресурсам, системам распределённых вычислений, специальным лабораториям с инже-

рами и программистами. Возникает вопрос: можно ли с помощью более скромных ресурсов проводить научные исследования не только небольших подмножеств каталога, таких как TGAS [4] или Gaia DR2 with Radial Velocities [5], но и всего объёма данных? Практика показала, что при чётко поставленных задачах, известной оптимизации вычислительных процессов, быстрых носителях данных, современных персональных компьютерах с достаточной оперативной памятью такая работа вполне возможна и служит хорошей подготовкой к обработке финальной версии каталога (видимо, первой, так как очевидно, что будут дальнейшие её улучшения).

Качество индивидуальных параллаксов в Gaia EDR3 весьма далеко от прогнозируемого, поэтому мы провели серию стандартных исследований, уже применявшихся к массовым каталогам, например, к NOMAD [6], где содержится 1.1 млрд объектов, или PPMXL [7] — 910 млн звёзд.

ОРГАНИЗАЦИЯ КАТАЛОГА

Исходные данные каталога EDR3 доступны на официальном сайте Gaia в виде 3386 сжатых файлов объёмом около 200 Мбайт каждый. При распаковке объём файла возрастает примерно в 2 ра-



ЦВЕТКОВ Александр Станиславович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии СПбГУ.

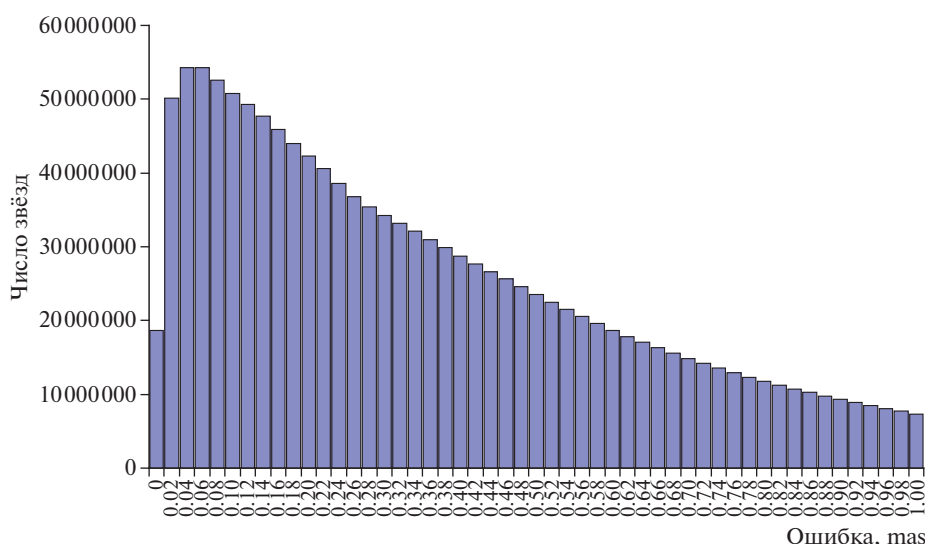


Рис. 1. Распределение звёзд Gaia EDR3 по ошибке параллакса

за — до 400–450 Мбайт. Таким образом, полный объём скачиваемых данных составляет около 670 Гбайт, а распакованный требует хранилища объёмом около 1.5 Тбайт. Формат файлов — CSV — текстовый, поля записи каждой звезды разделены запятыми. Если какие-либо данные отсутствуют (а так бывает часто), две запятые идут подряд. Такой формат исходных данных легко поддерживается языком FORTRAN [8].

Каждая строка содержит информацию о 99 полях для одной звезды. Подробное описание каждого поля приведено в работе [9]. Поля можно разделить по следующим категориям:

- идентификаторы;
- астрометрические параметры: координаты, собственные движения, параллакс и их ошибки;
- корреляции между параметрами;
- число и качество астрометрических наблюдений;
- фотометрия в трёх полосах;
- лучевые скорости (из DR2);
- галактические и эклиптические координаты.

Следует сказать, что полное чтение каталога в текстовом виде занимает много часов. Для звёздно-кинематических исследований далеко не все поля необходимы, поэтому первая процедура при обработке таких данных — выделение нужной информации и запись данных в бинарном виде так, чтобы при последующем чтении не преобразовывать их. Процедуру переформатирования, которая действительно потребует чтения всех текстовых данных, достаточно провести однократно. Для наших целей мы выбрали 22 основных поля, при этом полный объём несжатых бинарных данных сократился до 250 Гбайт, а с учётом возмож-

ностей современных файловых систем динамически сжимать данные (это увеличивает скорость чтения — нужно читать меньше блоков) объём составил всего 180 Гбайт. Размещение таких сравнительно небольших данных на быстром винчестере, а лучше на SSD, приводит к значительному увеличению скорости решения задач, требующих чтения всего каталога.

ОБЩИЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Перед проведением любых исследований необходимо понять точность, объём и основные особенности наблюдательного материала. Хотя на сайте Gaia приведено много информации такого рода, всегда следует повторять эти исследования самостоятельно, чтобы убедиться в правильности всего вычислительного процесса.

Параллаксы. Самый важный планируемый результат Gaia — высокоточные индивидуальные параллаксы звёзд. Сейчас заявленная точность (0.01 мсд — миллисекунды дуги) для большинства звёзд ещё не достигнута [10]. Данные о параллаксе в каталоге имеют 1 467 744 818 звёзд, в то время как для 343 964 953 звёзд их нет. На рисунке 1 показано распределение звёзд по абсолютной ошибке параллакса, выраженной в мсд. Анализ этой диаграммы свидетельствует, что существует большая доля звёзд, у которых ошибки составляют десятки доли мсд и выше. Точность лучше 0.2 мсд имеют только 500 млн звёзд, то есть примерно треть из имеющих данные о параллаксах. Это приводит к распределению звёзд по относительной ошибке параллакса σ_π/π , как представлено на рисунке 2. Примерно такая же часть (520 млн)

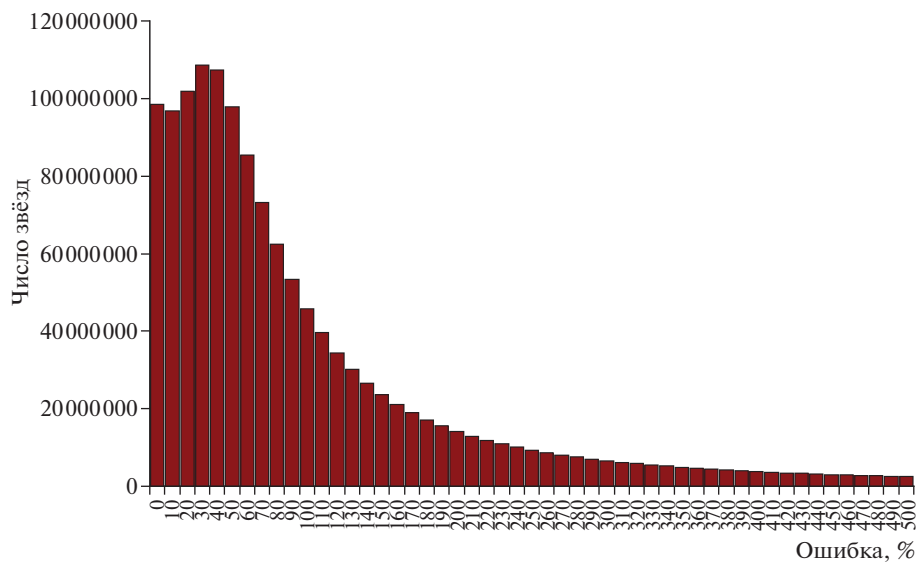


Рис. 2. Распределение звёзд Gaia EDR3 по относительной ошибке параллакса

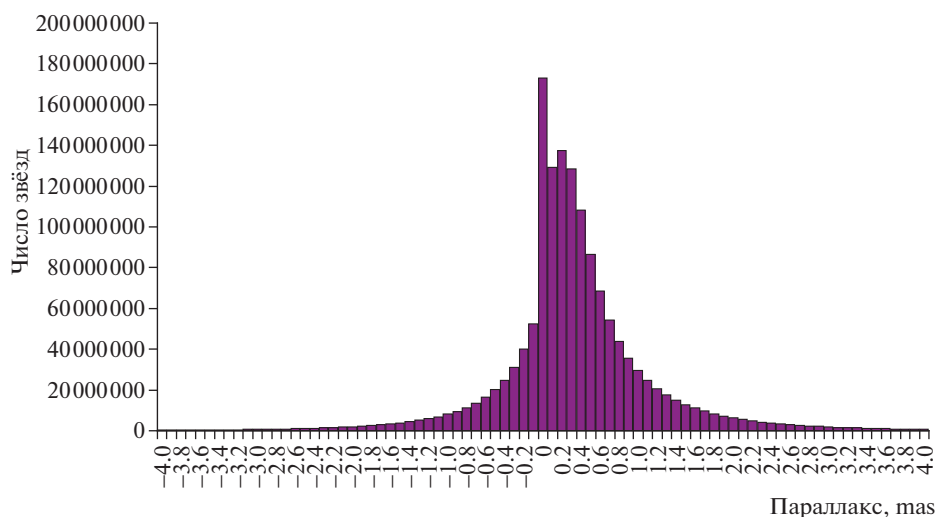


Рис. 3. Распределение звёзд Gaia EDR3 по параллаксам

звёзд имеет относительную погрешность параллакса лучше 50%, а меньше — 10% — только 98 млн.

Самый интересный результат — распределение звёзд по параллаксам (рис. 3). Видно, что 283 млн звёзд имеют отрицательный параллакс, что противоречит геометрическому смыслу самого понятия. При этом, как показывает детальный анализ, совершенно необязательно, чтобы у таких параллаксов были большие среднеквадратичные ошибки. Данный факт говорит о том, что работа над параллаксами Gaia ещё требует значительных усилий и установления точного нуля-пункта параллаксов.

Таким образом, индивидуальные параллаксы следует использовать с осторожностью, хотя статистически для больших групп звёзд усреднённые параллаксы дают довольно надёжные результаты, что будет продемонстрировано на примере построения диаграммы Герцшпрунга—Рессела.

Собственные движения. Данные о собственных движениях $\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ имеют все без исключения 1 811 709 771 звезда. Приведённые в каталоге точности в случайном отношении тоже пока не достигли проектируемых. Лишь 213 млн звёзд имеют полную точность собственного движения лучше 0.1 мсд/год, а 406 млн — лучше 0.2 мсд/год. Однако относительная точность собственных движений значительно лучше, чем у параллаксов,

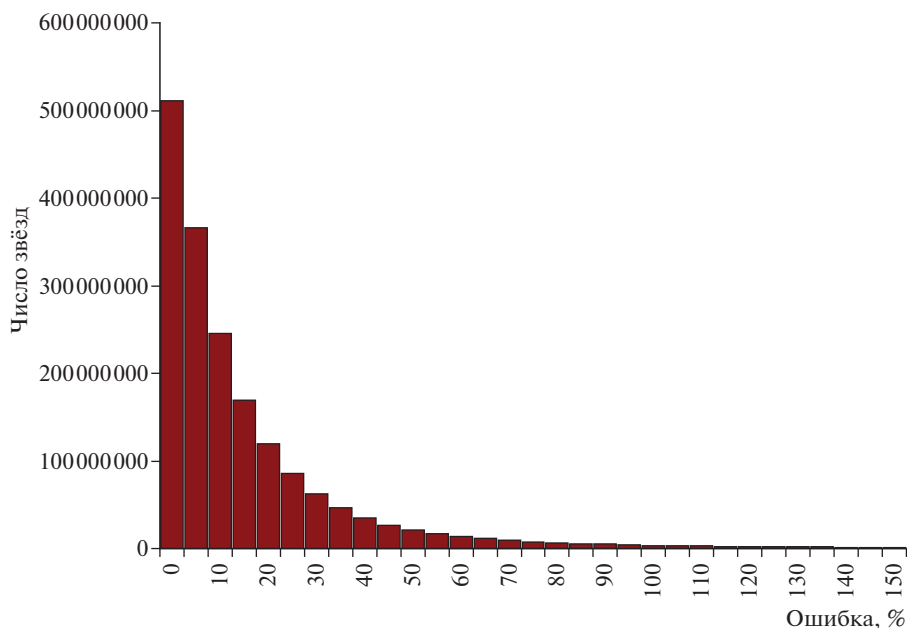


Рис. 4. Распределение звёзд Gaia EDR3 по относительной ошибке полного собственного движения

в силу того что сами собственные движения больше параллактических смещений (рис. 4). Полное собственное движение 77% звёзд заключено в интервале от 2 до 8 мсд/год, а 93% — в интервале от 0 до 10 мсд/год. Таким образом, почти половина звёзд каталога имеет относительную точность собственных движений лучше 10%. Такая высокая точность позволяет проводить любые звёздно-кинематические исследования, базирующиеся на анализе собственных движений звёзд.

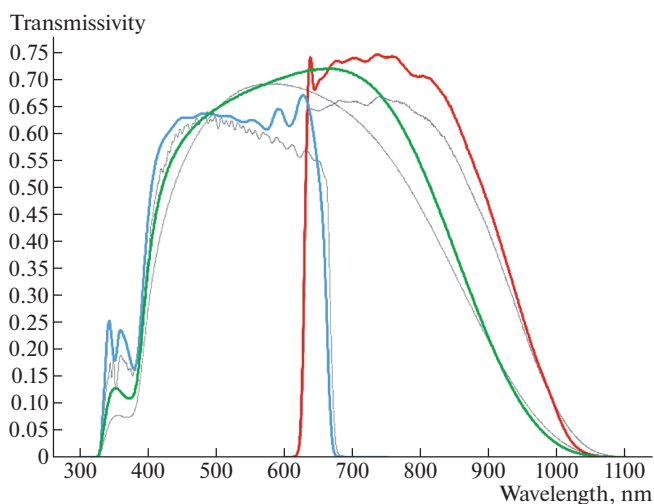


Рис. 5. Полосы пропускания Gaia EDR3: цветные линии на рисунке показывают полосы пропускания G (зелёный), B_p (синий) и R_p (красный), определяющие фотометрическую систему Gaia EDR3

Фотометрия. Gaia использует собственную фотометрическую систему [11]. Полосы пропускания показаны на рисунке 5¹. Они совсем не похожи ни на шкалу UBV Джонсона [12], ни на систему Hipparcos/Tycho [13]. Синяя компонента G_{Bp} охватывает область от ближнего ультрафиолета до красного цвета, красная G_{Rp} — от красного до инфракрасного диапазона. От шкалы UBV эту систему отличают не только другие границы диапазонов полос, но и их ширина. Пики шкалы Джонсона значительно уже и не накладываются друг на друга. Связь фотометрической шкалы Gaia с другими подобными системами будет установлена позже [14].

Звёздная величина G имеется практически у всех звёзд (только у 5 млн она отсутствует), в то время как фотометрической величиной B_p (blue photometer) и R_p (red photometer) обладают чуть более чем 1.5 млрд звёзд (у 270 млн её нет).

В каталоге приведены измеренные потоки фотонов в трёх полосах и их ошибки, а ошибок самих звёздных величин нет, так как “звёздные величины связаны нелинейным образом с измеренным потоком” [9].

На рисунке 6 представлено распределение звёзд Gaia по звёздной величине G . Максимум распределения приходится на 20 величину.

¹ Журнал “Вестник РАН” с цветными изображениями размещается в открытом доступе на сайте ИКЦ “Академнига” <https://sciencejournals.ru/journal/vestnik/>. Для доступа к полным текстам журнала не требуется регистрации.

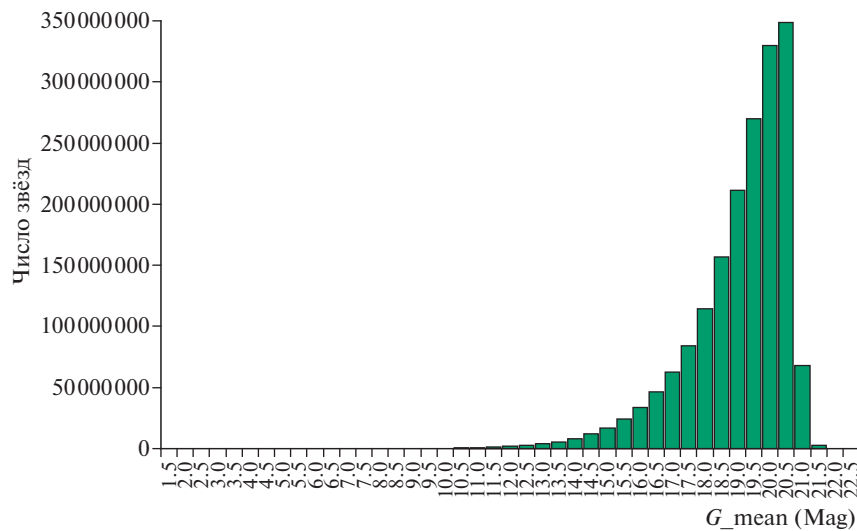


Рис. 6. Распределение звёзд Gaia EDR3 по звёздной величине G

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЁЗД ПО НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ

Звёздная плотность в зависимости от величины G .

Распределение звёзд каталога по небесной сфере показывает, что даже для ярких звёзд ($G = 8$) отчётливо наблюдается концентрация к галактическому экватору. Это говорит о том, что среди них уже есть далёкие объекты. Для более слабых звёзд ($G = 20$) концентрация просматривается к галактической плоскости и балджу — основной наблюдаемый эффект (рис. 7). Для представления звёздной плотности небесная сфера была разделена методом HealPix [15] с ключевым числом $N = 64$, что давало 49 152 площадки. Таким образом, одна площадка занимала немногим меньше 1 кв. градуса — точнее, 0.83. Приведённые иллюстрации могут составить неверное ощущение, что

звёзд в околополярных областях практически нет, но это не так. Даже вдали от галактического экватора их плотность составляет сотни звёзд на кв. градус. Ясно, что слабые звёзды, располагающиеся вдали от галактического экватора, — в основном близкие карлики.

Звёздная плотность в зависимости от расстояния до звёзд. Любопытно выглядит зависимость распределения звёзд по небесной сфере от расстояния. Если задаться относительной точностью определения параллаксов лучше 100% (параллакс больше ошибки), то даже для близких звёзд, до которых расстояние, по данным Gaia, менее 200 пк, наблюдается отчётливая концентрация к галактическому экватору (рис. 8). Более того, ясно видны даже Магеллановы облака. Картина для близких звёзд не сильно отличается от распределения

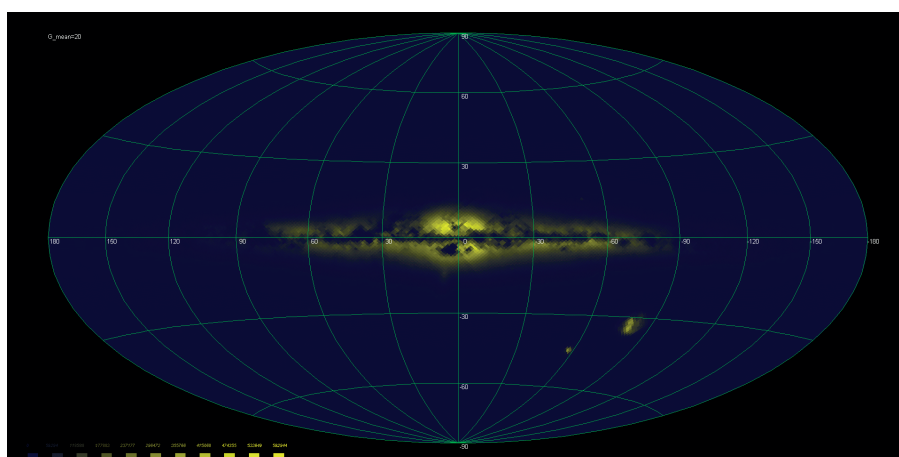


Рис. 7. Распределение Gaia DR3 по небесной сфере для звёзд с $G = 20^m$ (максимальная плотность — около 600 тыс. звёзд на пиксель, 1 пиксель = 0.83 кв. градуса)

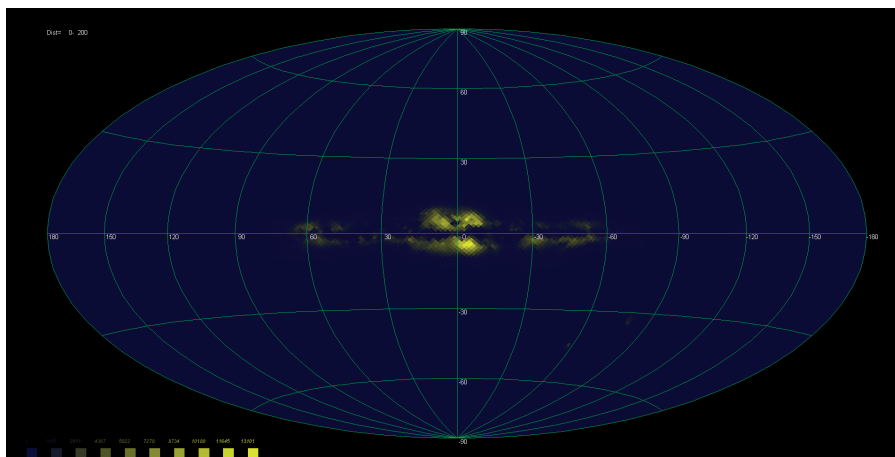


Рис. 8. Распределение Gaia DR3 по небесной сфере для звёзд расстояний (относительная точность параллакса $<100\%$) от 0 до 200 пк (максимальная плотность — около 13 000 звёзд на пиксель, 1 пиксель = 0.83 кв. градуса)

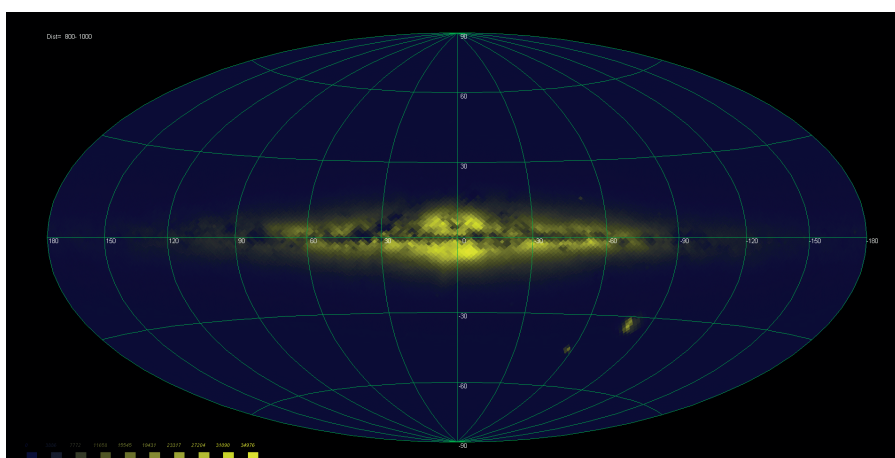


Рис. 9. Распределение Gaia DR3 по небесной сфере для звёзд расстояний (относительная точность параллакса $<100\%$) от 800 до 1000 пк (максимальная плотность — около 34 тыс. звёзд на пиксель, 1 пиксель = 0.83 кв. градуса)

звёзд с расстояниями от 800 пк до 1 Кпк (рис. 9), да и это распределение, на котором виден балдж Галактики, скорее характерно для очень далёких звёзд (несколько Кпк). Похожий характер сохраняется и для звёзд других расстояний. Это наводит на размышления о недостоверности параллаксов (даже в статистическом плане) для самых близких звёзд, где мы вправе ожидать высокой относительной точности параллаксов в силу их расположения.

Однако если ограничиться звёздами, для которых параллакс определён с точностью 10% и лучше, то картина меняется. Единственный странный результат — опять самые близкие звёзды, где по-прежнему наблюдается их концентрация к экватору. Для других расстояний картина более предсказуема. Звёзды, находящиеся ближе 1 Кпк, равномернее распределены по небесной сфере,

хотя, конечно, прослеживается их концентрация к галактическому диску (рис. 10). Далёкие звёзды чётко показывают диск Галактики (рис. 11).

Распределение среднего показателя цвета звёзд. Весьма любопытно изучение распределения среднего показателя цвета звёзд $Bp-G$ для разных точек небесной сферы (рис. 12). В данном случае для построения максимально подробного изображения высокого разрешения (количество звёзд это позволяет) мы отказались от площадок Heal-Pix. Вместо них используем просто точки изображения. Само изображение имеет размер 2000×1000 точек. Даже беглый взгляд приводит к выводу, что наблюдается “покраснение” цвета звёзд, вызванное пылевой материей. Отчётливо видна волокнистая структура газопылевых облаков. Аналогичная картина наблюдается и для других показателей цвета. Очевидно, что пылевые

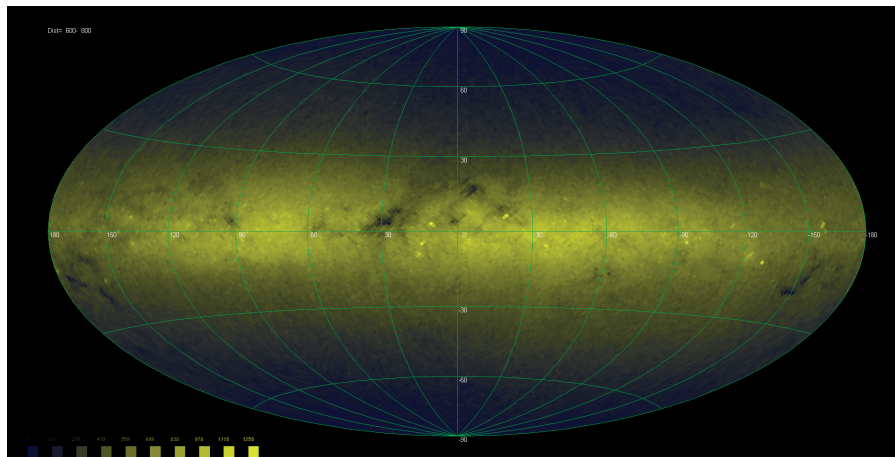


Рис. 10. Распределение Gaia DR3 по небесной сфере для звёзд расстояний (относительная точность параллакса $<10\%$) от 600 до 800 пк (максимальная плотность — около 1200 звёзд на пиксель, 1 пиксель = 0.83 кв. градуса)

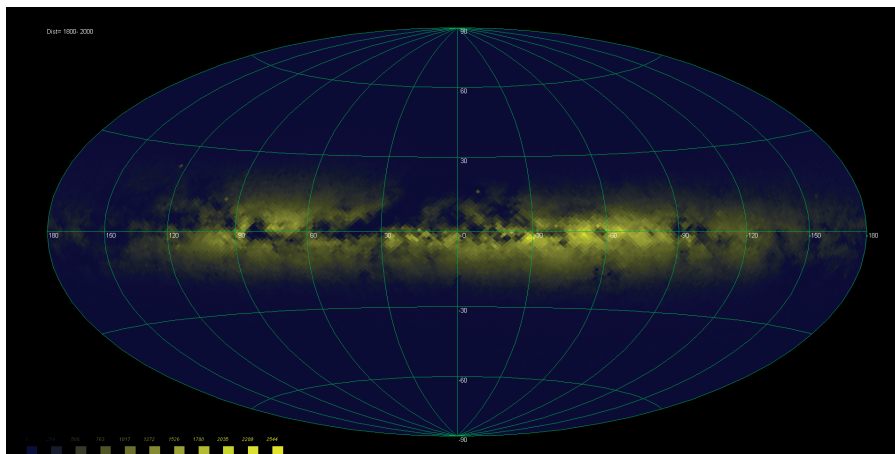


Рис. 11. Распределение Gaia DR3 по небесной сфере для звёзд расстояний (относительная точность параллакса $<10\%$) от 1.8 до 2.0 Кпк (максимальная плотность — около 2500 звёзд на пиксель, 1 пиксель = 0.83 кв. градуса)

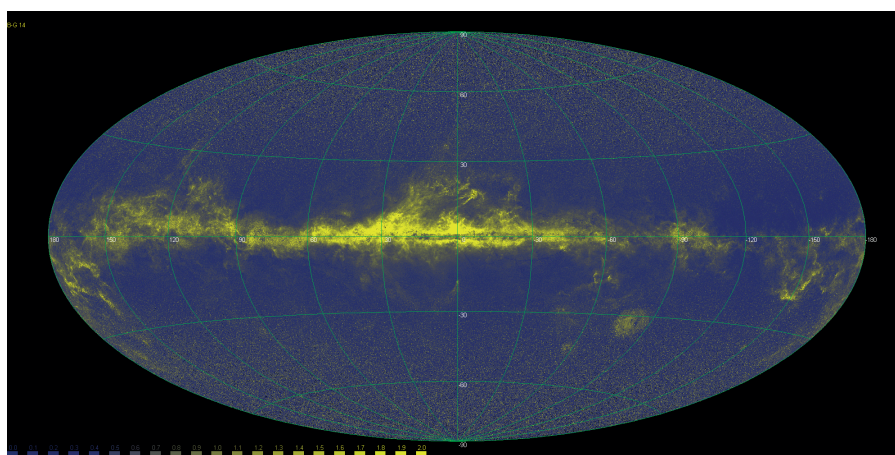


Рис. 12. Значение среднего показателя цвета B_p-G звёзд Gaia DR3 14 звёздной величины G в зависимости от положения на небесной сфере (синий цвет соответствует значению 0.0, жёлтый — 2.0)

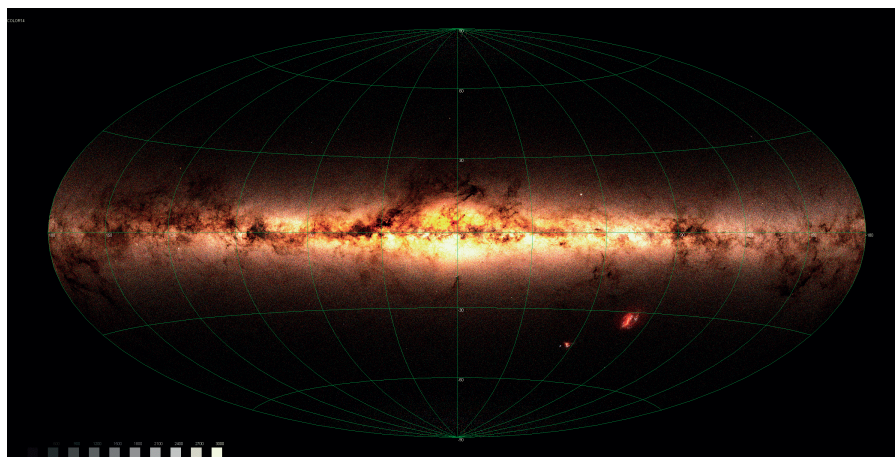


Рис. 13. Псевдоцветное изображение звёзд Gaia DR3 14 звёздной величины G

облака не только вызывают покраснение, но и значительно ослабляют свет звёзд, что следует учитывать при проведении исследований, в которых будет фигурировать звёздная или абсолютная звёздная величина.

Более пристальное внимание к полярным областям показывает, что, во-первых, пылевой материи в этом направлении почти нет, во-вторых, в полярных областях можно заметить как звёзды с высоким показателем цвета (2 и более), так и с низким (0.5–0.7). Скорее всего, это близкие звёзды главной последовательности и белые карлики.

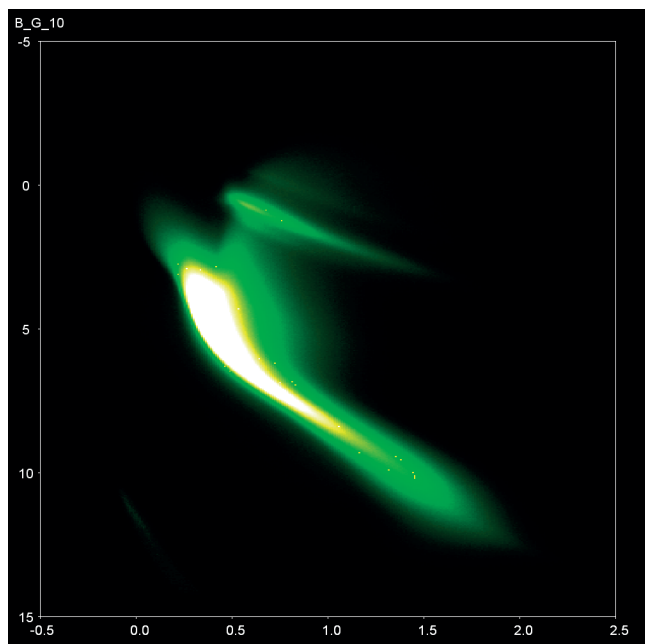


Рис. 14. Диаграмма “показатель цвета B_p-G — абсолютная звёздная величина G ” для звёзд с относительной точностью параллакса лучше 10%

Небесная сфера в квазицветном изображении.

Трёхцветная фотометрия позволяет построить псевдоцветные изображения небесной сферы, которые имеют не только познавательную, но и эстетическую и ценность. Действительно, переведём фотометрическую шкалу B_p , G и R_p в шкалу RGB , использующуюся в компьютерных изображениях, и ясно увидим (рис. 13), как происходит поглощение света в пылевых облаках, как распределены звёзды разных спектральных классов по небесной сфере.

ДИАГРАММЫ ГЕРЦШПРУНГА–РЕССЕЛА

Наличие расстояний и многоцветной фотометрии позволяет построить диаграмму Герцшпрунга–Рессела, точнее, диаграмму “показатель цвета — абсолютная звёздная величина”. В качестве показателя цвета можно выбрать B_p-G , B_p-R_p или $G-R_p$. Их связь со стандартным колор-индексом $B-V$ ещё не окончательно откалибрована [16]. Использование звёзд с разной точностью параллаксов кардинально меняет всю картину. Действительно, если задаться точностью параллаксов в 10% и лучше, то на диаграмме (рис. 14) прекрасно различаются все основные последовательности и даже подпоследовательности. Кроме главной последовательности отчётливо видна ветвь красных гигантов и субгигантов. В левом нижнем углу довольно тонкая область белых карликов. Изображение построено в условных цветах: зелёный цвет максимальной интенсивности соответствует попаданию 250 звёзд в пиксель размером $0.04''$ по абсолютной звёздной величине и $0.01''$ по показателю цвета, жёлтый цвет — уже около 500, а белый — свыше 750 звёзд.

При переходе к звёздам с точностью параллаксов лучше 50% картина размывается. Основной эффект — смещение звёзд вниз, в сторону увеличения абсолютной звёздной величины, то есть

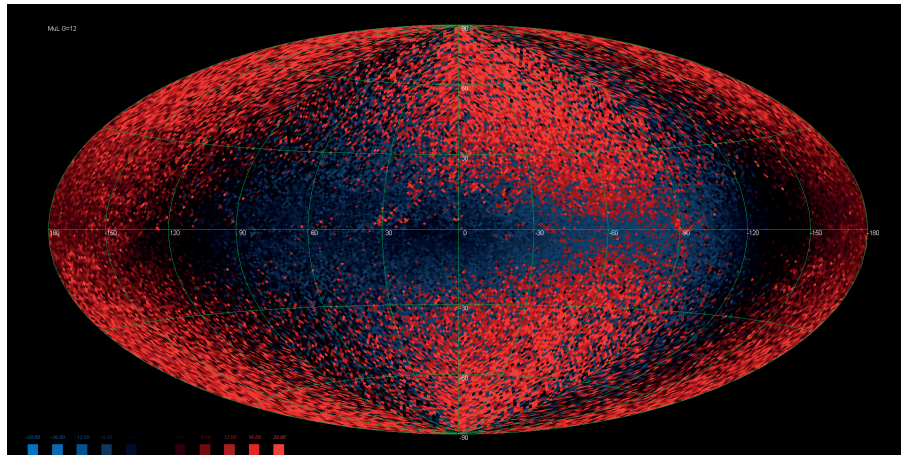


Рис. 15. Поведение собственных движений $\mu_l \cos b$ для звёзд $G = 12$ (от -20 до $+20$ mas/год)

уменьшения светимости. На самом деле звёзды более яркие располагаются на больших расстояниях, а параллаксы Gaia сдвинуты в сторону увеличения, другими словами, расстояния до звёзд оказываются преуменьшенными. Это подтверждается и распределением близких звёзд по небесной сфере, которые на самом деле далёкие, поэтому и концентрируются к галактическому экватору.

СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗВЁЗД

Поведение собственных движений звёзд разных величин. В каталоге Gaia приводятся только экваториальные собственные движения звёзд $\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ . Для звёздно-кинематических исследований не составляет никакого труда перевести их в галактические $\mu_l \cos b$ и μ_b :

$$\begin{aligned} \mu_l \cos b &= \cos \varphi \cdot \mu_\alpha \cos \delta + \sin \varphi \cdot \mu_\delta, \\ \mu_b &= -\sin \varphi \cdot \mu_\alpha \cos \delta + \cos \varphi \cdot \mu_\delta, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{\sin i \cos (l - L_0)}{\cos \delta}, \\ \cos \varphi &= \frac{\cos b \cos i - \sin b \sin i \sin (l - L_0)}{\cos \delta}, \end{aligned} \quad (2)$$

здесь i — угол наклона галактического экватора (62.87° на J 2000), а L_0 — разность долгот между направлением на центр Галактики и пересечением небесного и галактического экваторов (32.93°). Так как эти величины используются часто, то при формировании бинарных файлов из текстового каталога их можно сразу сосчитать и записать с целью экономии времени вычислений в дальнейшем.

Перед оценкой звёздно-кинематических параметров посмотрим на поведение собственных

движений в зависимости от используемой звёздной величины. Для собственных движений по долготе (рис. 15, 16) и широте (рис. 17, 18) видно, что у ярких звёзд ($G = 10$) картина комбинированная, присутствуют различные кинематические эффекты, в то время как для слабых звёзд ($G = 20$), очевидно, остаются только общие глобальные кинематические эффекты, такие как вращение Галактики.

Параметры стандартной звёздно-кинематической модели. В качестве первой мы используем широко известную модель Огородникова—Милна [17], подробный вид уравнений этой модели изложен также в [18, 19]. В этой модели поле скоростей звёзд представляется линейным выражением

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} + \mathbf{M}^+ \times \mathbf{r}, \quad (3)$$

где V — скорость звезды, V_0 — влияние поступательного движения Солнца, $\boldsymbol{\Omega}$ — угловая скорость твердотельного вращения звёздной системы, \mathbf{M}^+ — симметричный тензор деформации поля скоростей.

Модель содержит 12 параметров, однако не все они могут быть независимо определены из собственных движений и не все параметры входят в уравнения для лучевых скоростей:

U, V, W — компоненты вектора \mathbf{V}_0 поступательного движения Солнца среди звёзд;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ — компоненты вектора угловой скорости $\boldsymbol{\Omega}$;

$M_{11}^+, M_{22}^+, M_{33}^+$ — параметры тензора деформации, описывающие сжатие—растяжение вдоль главных осей галактической системы координат;

$M_{12}^+, M_{13}^+, M_{23}^+$ — параметры тензора \mathbf{M}^+ , описывающие деформацию поля скоростей в основной и двух перпендикулярных плоскостях.

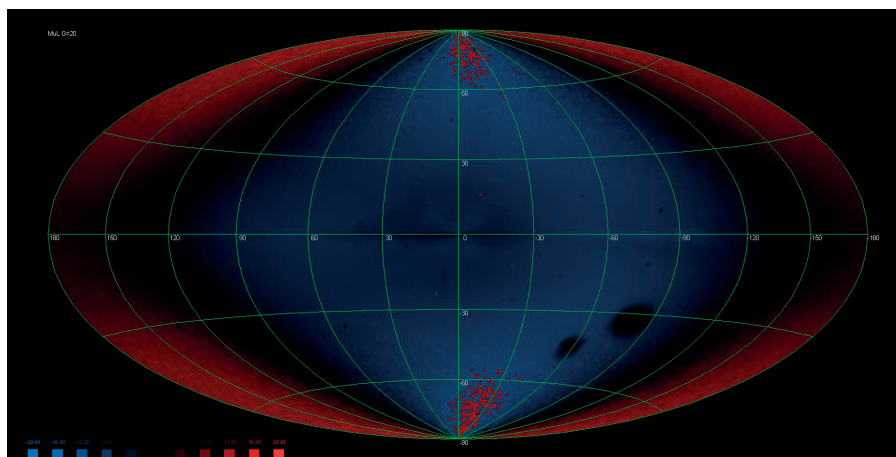


Рис. 16. Поведение собственных движений $\mu_l \cos b$ для звёзд $G = 20$ (от -20 до $+20$ mas/год)

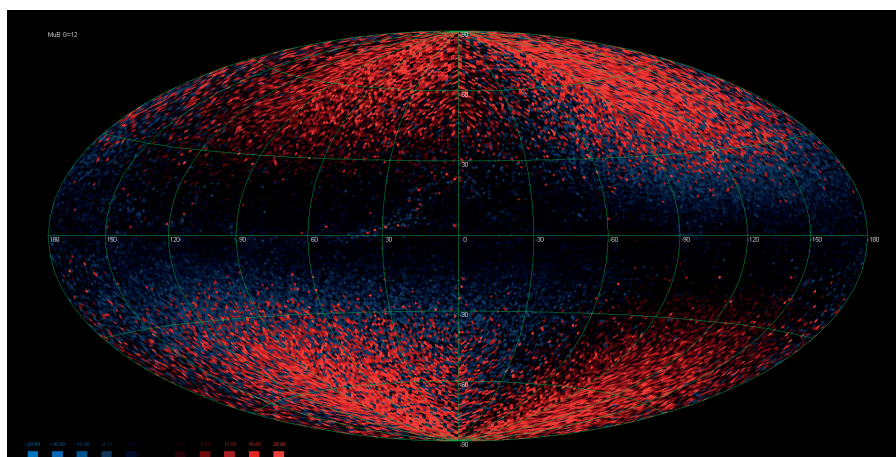


Рис. 17. Поведение собственных движений μ_b для звёзд $G = 12$ (от -20 до $+20$ mas/год)

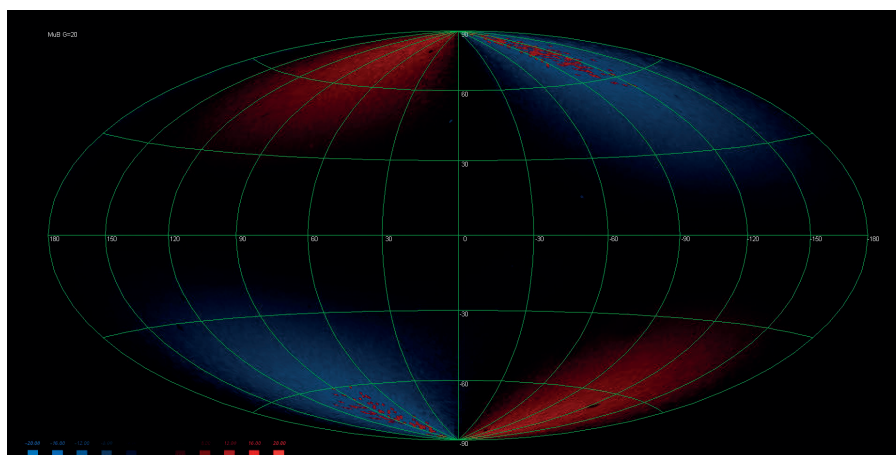


Рис. 18. Поведение собственных движений μ_b для звёзд $G = 20$ (от -20 до $+20$ mas/год)

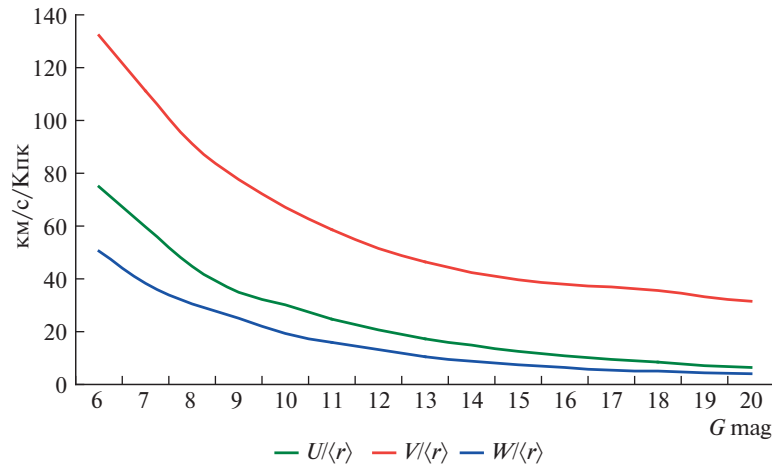


Рис. 19. Зависимость кинематических параметров движения Солнца $U/\langle r \rangle$, $V/\langle r \rangle$, $W/\langle r \rangle$ от звёздной величины (км/с/Кпк)

Спроецировав уравнение (3) на орты галактической системы координат, получаем:

$$k\mu_l \cos b = U/r \sin l - V/r \cos l - \omega_1 \sin b \cos l - \omega_2 \sin b \sin l + \omega_3 \cos b + M_{12}^+ \cos b \cos 2l - M_{13}^+ \sin b \sin l + M_{23}^+ \sin b \cos l - \frac{1}{2} M_{11}^+ \cos b \sin 2l + \frac{1}{2} M_{22}^+ \cos b \sin 2l, \quad (4)$$

$$k\mu_b = U/r \cos l \sin b + V/r \sin l \sin b - W/r \cos b + \omega_1 \sin l - \omega_2 \cos l - \frac{1}{2} M_{12}^+ \sin 2b \sin 2l + M_{13}^+ \cos 2b \cos l + M_{23}^+ \cos 2b \sin l - \frac{1}{2} M_{11}^+ \sin 2b \cos^2 l - \frac{1}{2} M_{22}^+ \sin 2b \sin^2 l + \frac{1}{2} M_{33}^+ \sin 2b. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) имеется линейная зависимость между коэффициентами M_{11}^+ , M_{22}^+ , M_{33}^+ , поэтому авторы при анализе собственных движений обычно вводят замены $M_{11}^* = M_{11}^+ - M_{22}^+$ и $M_{33}^* = M_{33}^+ - M_{22}^+$ [18], либо [20], вместо M_{33}^* вводят величину

$$X = M_{33}^+ - \frac{M_{11}^+ + M_{22}^+}{2}. \quad (6)$$

В этом случае уравнения (4) и (5) переписываются в виде

$$k\mu_l \cos b = U/r \sin l - V/r \cos l - \omega_1 \sin b \cos l - \omega_2 \sin b \sin l + \omega_3 \cos b + M_{12}^+ \cos b \cos 2l - M_{13}^+ \sin b \sin l + M_{23}^+ \sin b \cos l - \frac{1}{2} M_{11}^* \cos b \sin 2l, \quad (7)$$

$$k\mu_b = U/r \cos l \sin b + V/r \sin l \sin b - W/r \cos b + \omega_1 \sin l - \omega_2 \cos l - \frac{1}{2} M_{12}^+ \sin 2b \sin 2l + M_{13}^+ \cos 2b \cos l + M_{23}^+ \cos 2b \sin l - \frac{1}{4} M_{11}^* \sin 2b \cos 2l + \frac{1}{2} X \sin 2b. \quad (8)$$

Уравнения (7), (8) часто используют для совместного решения по полным собственным движениям какого-либо каталога, при этом если неизвестно расстояние до звёзд, то вместо величин U , V , W определяют $U/\langle r \rangle$, $V/\langle r \rangle$, $W/\langle r \rangle$, где $\langle r \rangle$ — среднее расстояние выборки звёзд, для которой производят решение.

В таблицах 1, 2 приведено совместное решение для звёзд Gaia EDR3, а графики на рисунках 19–21 иллюстрируют данные таблиц.

Анализ этих результатов показывает, что солнечные члены $U/\langle r \rangle$, $V/\langle r \rangle$, $W/\langle r \rangle$, как и следовало ожидать, убывают с ростом звёздной величины, так как имеется полная корреляция между блеском звезды и расстоянием. Самая большая компонента — движение Солнца по оси Y — $V/\langle r \rangle$. Для ярких звёзд 3–6 величин данные параметры определяются ненадёжно, это справедливо и для остальных параметров. Причина — не только небольшое количество звёзд в этом диапазоне (их всё-таки не так мало для уравнений с 11 параметрами), но и пекулярная кинематика близких звёзд. На это обращали внимание исследователи ещё с 1950-х годов [21].

Рассматривая такой важный параметр, как угловая скорость твердотельного вращения системы ω_1 , ω_2 , ω_3 , мы видим также, что для самых ярких звёзд параметры вектора угловой скорости вообще не определяются, а, начиная со звёзд 7 ве-

Таблица 1. Значения компонент скорости движения Солнца и угловой скорости твердотельного вращения в км/с/Кпк, полученные из совместного решения для звёзд различных величин G

| G | $U/\langle r \rangle$ | $V/\langle r \rangle$ | $W/\langle r \rangle$ | ω_1 | ω_2 | ω_3 |
|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|------------------|
| 3 | 158.1 ± 44.5 | 294.2 ± 45.4 | 159.4 ± 42.5 | 45.6 ± 45.2 | 19.4 ± 45.7 | -26.4 ± 42.3 |
| 4 | 184.9 ± 31.3 | 209.2 ± 32.0 | 128.1 ± 29.3 | -59.5 ± 32.2 | 25.8 ± 32.6 | 3.6 ± 29.3 |
| 5 | 116.5 ± 10.6 | 181.0 ± 10.7 | 71.5 ± 9.9 | -13.1 ± 10.8 | 13.2 ± 10.9 | -21.1 ± 9.8 |
| 6 | 75.0 ± 4.9 | 132.3 ± 5.0 | 50.7 ± 4.5 | 6.1 ± 5.0 | 8.2 ± 5.1 | -15.6 ± 4.5 |
| 7 | 59.6 ± 1.9 | 111.2 ± 1.9 | 38.4 ± 1.8 | 1.9 ± 1.9 | -7.5 ± 2.0 | -12.2 ± 1.8 |
| 8 | 44.8 ± 1.0 | 91.3 ± 1.0 | 30.4 ± 1.0 | 0.6 ± 1.0 | -4.9 ± 1.0 | -11.4 ± 1.0 |
| 9 | 35.0 ± 0.6 | 77.7 ± 0.6 | 25.2 ± 0.6 | 1.5 ± 0.6 | -4.4 ± 0.6 | -10.7 ± 0.6 |
| 10 | 30.1 ± 0.3 | 67.1 ± 0.3 | 19.5 ± 0.3 | 0.6 ± 0.3 | -2.8 ± 0.3 | -11.6 ± 0.3 |
| 11 | 24.9 ± 0.2 | 58.8 ± 0.2 | 15.9 ± 0.2 | 0.8 ± 0.2 | -2.4 ± 0.2 | -11.8 ± 0.2 |
| 12 | 20.6 ± 0.1 | 51.6 ± 0.1 | 13.1 ± 0.1 | 0.2 ± 0.1 | -2.0 ± 0.1 | -11.9 ± 0.1 |
| 13 | 17.3 ± 0.1 | 46.3 ± 0.1 | 10.7 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 | -1.1 ± 0.1 | -12.4 ± 0.1 |
| 14 | 14.9 ± 0.1 | 42.5 ± 0.1 | 8.8 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 | -0.9 ± 0.1 | -12.8 ± 0.1 |
| 15 | 12.7 ± 0.1 | 39.8 ± 0.1 | 7.3 ± 0.1 | 0.5 ± 0.1 | -0.7 ± 0.1 | -12.9 ± 0.1 |
| 16 | 10.9 ± 0.1 | 38.1 ± 0.1 | 6.3 ± 0.1 | 0.6 ± 0.1 | -0.7 ± 0.1 | -12.6 ± 0.1 |
| 17 | 9.6 ± 0.0 | 36.9 ± 0.0 | 5.5 ± 0.0 | 0.6 ± 0.0 | -0.7 ± 0.0 | -12.3 ± 0.0 |
| 18 | 8.4 ± 0.0 | 35.5 ± 0.0 | 4.9 ± 0.0 | 0.4 ± 0.0 | -0.6 ± 0.0 | -12.1 ± 0.0 |
| 19 | 7.2 ± 0.0 | 33.2 ± 0.0 | 4.4 ± 0.0 | 0.2 ± 0.0 | -0.5 ± 0.0 | -11.9 ± 0.0 |
| 20 | 6.5 ± 0.0 | 31.7 ± 0.0 | 4.2 ± 0.0 | 0.3 ± 0.0 | -0.5 ± 0.0 | -11.8 ± 0.0 |

личины, вектор определяется хорошо и не перпендикулярен плоскости Галактики. Это факт также известен [22]. Интересны следующие обстоятельства. Во-первых, начиная со звёзд 12 вели-

чины, ошибки определяемых параметров становятся чрезвычайно малыми, то есть пекулярные скорости звёзд перестают играть значительную роль. Во-вторых, компоненты вектора вращения ω_1 , ω_2

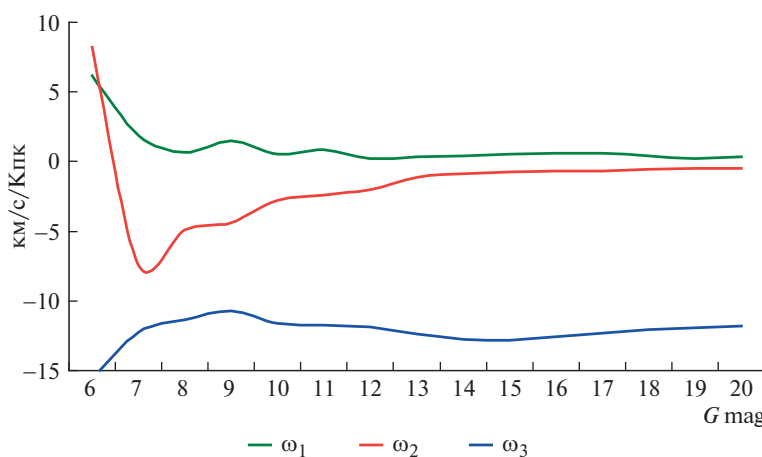


Рис. 20. Зависимость угловой скорости твердотельного вращения ω_1 , ω_2 , ω_3 от звездной величины (км/с/Кпк)

Таблица 2. Значения компонент тензора деформации в км/с/Кпк, полученные из совместного решения для звёзд различных величин G

| G | M_{12} | M_{13} | M_{23} | M_{11}^* | X |
|-----|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 3 | -36.1 ± 55.2 | 18.3 ± 58.1 | -126.9 ± 57.1 | 192.9 ± 110.8 | 1.1 ± 103.8 |
| 4 | -1.8 ± 37.8 | 4.1 ± 41.5 | 28.3 ± 39.6 | -127.3 ± 78.5 | 37.2 ± 74.8 |
| 5 | 15.1 ± 13.0 | 9.3 ± 13.7 | 2.1 ± 13.5 | 6.9 ± 25.9 | -39.9 ± 25.1 |
| 6 | 25.2 ± 6.0 | 17.1 ± 6.4 | -5.0 ± 6.3 | 1.3 ± 11.9 | 8.9 ± 11.6 |
| 7 | 14.6 ± 2.3 | -3.3 ± 2.5 | -3.4 ± 2.4 | 2.8 ± 4.6 | -7.0 ± 4.4 |
| 8 | 15.2 ± 1.3 | -2.3 ± 1.3 | -2.9 ± 1.3 | -3.0 ± 2.5 | -2.1 ± 2.3 |
| 9 | 15.6 ± 0.8 | -1.9 ± 0.8 | -1.9 ± 0.8 | -1.2 ± 1.6 | 1.6 ± 1.4 |
| 10 | 17.1 ± 0.4 | -0.9 ± 0.4 | -1.1 ± 0.4 | -0.3 ± 0.9 | -0.7 ± 0.7 |
| 11 | 15.9 ± 0.2 | -0.5 ± 0.2 | -1.3 ± 0.2 | -1.3 ± 0.5 | 1.3 ± 0.4 |
| 12 | 15.2 ± 0.2 | -0.5 ± 0.2 | -0.4 ± 0.2 | -1.2 ± 0.3 | 0.6 ± 0.3 |
| 13 | 14.3 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | -1.4 ± 0.2 | 1.4 ± 0.2 |
| 14 | 13.3 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | -1.1 ± 0.2 | 1.0 ± 0.1 |
| 15 | 12.7 ± 0.1 | -0.4 ± 0.1 | -0.4 ± 0.1 | -0.9 ± 0.1 | 0.9 ± 0.1 |
| 16 | 12.1 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | -0.5 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | 0.5 ± 0.1 |
| 17 | 11.4 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | -0.4 ± 0.1 | 0.1 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 |
| 18 | 10.2 ± 0.1 | 0.1 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 |
| 19 | 9.1 ± 0.0 | 0.2 ± 0.0 | 0.0 ± 0.0 | 0.5 ± 0.1 | 0.6 ± 0.1 |
| 20 | 8.6 ± 0.0 | 0.1 ± 0.0 | -0.1 ± 0.0 | 0.4 ± 0.1 | 0.6 ± 0.1 |

значимо отличаются от нуля даже для слабых (и, по-видимому, далёких) звёзд, это указывает на то, что вектор вращения не совсем перпендикулярен плоскости Галактики.

Анализ компонент тензора деформации показывает, что практически все компоненты, за исключением параметра M_{12} (а это параметр Оорта A), быстро убывают к нулевым значениям. Исключе-

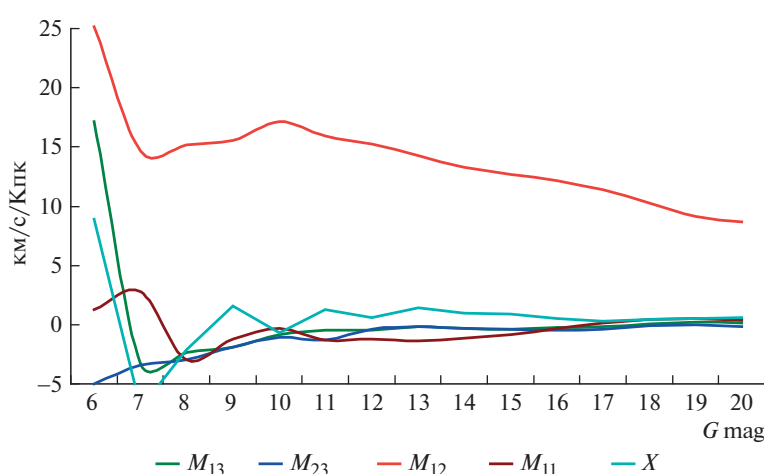
**Рис. 21.** Зависимость компонент тензора деформации M_{12} , M_{13} , M_{23} , M_{11}^* , X от звездной величины (км/с/Кпк)

Таблица 3. Значения компонент скорости движения Солнца в км/с и угловой скорости твердотельного вращения в км/с/Кпк, полученные из совместного решения для звёзд различных расстояний

| r | U | V | W | ω_1 | ω_2 | ω_3 |
|-----------|----------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 0–100 | 10.2 ± 0.1 | 22.0 ± 0.1 | 7.2 ± 0.1 | -1.1 ± 1.4 | -12.1 ± 1.4 | -1.5 ± 1.4 |
| 100–200 | 9.7 ± 0.0 | 23.2 ± 0.0 | 7.3 ± 0.0 | 1.2 ± 0.2 | -6.3 ± 0.2 | -10.1 ± 0.2 |
| 200–300 | 9.9 ± 0.0 | 24.7 ± 0.0 | 7.7 ± 0.0 | 1.1 ± 0.1 | -2.5 ± 0.1 | -12.5 ± 0.1 |
| 300–400 | 10.3 ± 0.0 | 25.8 ± 0.0 | 7.8 ± 0.0 | 0.8 ± 0.1 | -1.3 ± 0.1 | -13.0 ± 0.1 |
| 500–600 | 10.8 ± 0.0 | 27.7 ± 0.0 | 7.8 ± 0.0 | 1.0 ± 0.0 | -1.1 ± 0.0 | -13.7 ± 0.0 |
| 700–800 | 11.5 ± 0.0 | 30.7 ± 0.0 | 7.8 ± 0.0 | -0.1 ± 0.0 | -0.4 ± 0.0 | -13.7 ± 0.0 |
| 900–1 K | 12.1 ± 0.0 | 34.6 ± 0.0 | 8.0 ± 0.0 | 0.1 ± 0.0 | 0.2 ± 0.0 | -13.7 ± 0.0 |
| 1.2–1.3 K | 12.9 ± 0.1 | 40.5 ± 0.1 | 8.0 ± 0.1 | 0.7 ± 0.0 | 0.5 ± 0.0 | -13.8 ± 0.0 |
| 1.5–1.6 K | 13.4 ± 0.1 | 46.5 ± 0.1 | 8.1 ± 0.1 | 1.2 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 | -14.0 ± 0.1 |
| 1.8–1.9 K | 13.4 ± 0.1 | 52.4 ± 0.1 | 8.0 ± 0.1 | 1.2 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 | -14.2 ± 0.1 |
| 2.1–2.2 | 13.5 ± 0.2 | 58.2 ± 0.2 | 8.0 ± 0.2 | 1.2 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 | -14.5 ± 0.1 |
| 2.4–2.5 | 13.9 ± 0.2 | 62.2 ± 0.2 | 7.8 ± 0.2 | 0.0 ± 0.1 | 0.0 ± 0.1 | -14.9 ± 0.1 |

ние составляет параметр M_{11} , ответственный за разность растяжений звёздной системы по осям X и Y . Он довольно долго сохраняет ненулевое значение, и лишь для звёзд 16, 17 величины и слабее сильно уменьшается.

Зависимость параметров стандартной звёздно-кинематической модели от расстояний. Анализ распределений звёзд по параллаксам и их точностям показывает, что для звёздно-кинематических исследований, которые нуждаются в расстояниях, следует использовать звёзды с высокой относительной точностью параллаксов. Для этого мы создали подкаталог, состоящий из 98 506 335 звёзд, которые удовлетворяют этому критерию. Объём бинарного файла составил всего 14 Гбайт (по сравнению с 260 полного каталога). Соответственно, почти в 20 раз увеличилась скорость работы с этими данными. Так как пока даже 10%-ная точность параллакса не гарантирует истинного значения параллакса каждой звезды, мы поступили стандартным образом, разбив звёздный материал на сферические слои, удалённые от Солнца на разные расстояния. Для этих групп звёзд решены уравнения в рамках модели Огородникова–Милна и произведено разложение собственных движений по системе векторных сферических функций. Результаты отражены в таблицах 3 и 4. Для компактности расстояния, начиная с 400 пк, приведены не подряд, так как значения изменяются медленно. Полные версии таблиц содержатся в электронном Приложении (http://school.podvorye.ru/astro/GAIA_EDR3/).

В таблице 4 указано дополнительно число звёзд, использовавшихся в решении. Само решение базировалось на усреднённых данных собственных движений и расстояний по 49 152 площадкам HealPix ($N = 64$) с их равными весами. Рисунки 22–24 иллюстрируют содержание таблиц 3 и 4.

Анализ результатов показывает, что в пределах 1.5–2 Кпк трёхмерная модель в состоянии удовлетворительно описывать кинематику звёзд, хотя сами параметры претерпевают порой значительные изменения в зависимости от рассматриваемой группы звёзд (особенно солнечный параметр U). По-прежнему самые близкие звёзды составляют проблемную область, в которой кинематика не подчиняется трёхмерной модели. Однако с расстояния примерно 300 пк кинематические параметры принимают свои обычные значения. Звёзды ближе 100 пк имеют большие пекулярные скорости, которые с расстоянием просто перестают быть заметными, поскольку нарастают глобальные эффекты вращения Галактики.

Вообще говоря, считается, что упрощённая линейная модель Оорта–Линдблада или полная Огородникова–Милна может использоваться до расстояний 1–1.5 Кпк [17]. Но мы видим, что в принципе параметры Оорта $A = M_{12}$ и $B = \omega_3$ хоть и меняются с расстоянием, но очень плавно, сохраняя свой общий характер. Прочие параметры — как компоненты угловой скорости ω_1 , ω_2 , так и тензора деформации M_{11}^* , M_{13} , M_{23} , X — с увеличе-

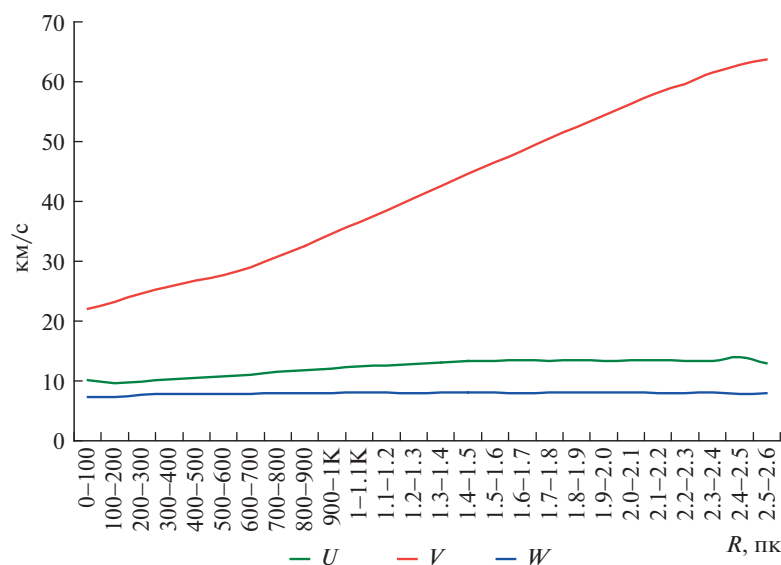
Таблица 4. Значения компонент тензора деформации в км/с/Кпк, полученные из совместного решения для звёзд различных расстояний, а также число звёзд, участвовавших в решении

| r | M_{12} | M_{13} | M_{23} | M_{11}^* | X | N |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------|
| 0–100 | 28.0 ± 1.8 | 4.2 ± 1.8 | -2.4 ± 1.8 | -1.7 ± 3.6 | 0.1 ± 3.6 | 372226 |
| 100–200 | 19.4 ± 0.3 | -1.3 ± 0.3 | -1.2 ± 0.3 | -2.3 ± 0.5 | 0.1 ± 0.5 | 1862090 |
| 200–300 | 15.7 ± 0.1 | -0.7 ± 0.1 | -0.8 ± 0.1 | -5.1 ± 0.2 | 1.6 ± 0.2 | 3515477 |
| 300–400 | 14.7 ± 0.1 | -0.5 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | -5.9 ± 0.2 | 2.2 ± 0.1 | 4696935 |
| 500–600 | 14.5 ± 0.1 | -1.1 ± 0.1 | -0.6 ± 0.1 | -6.5 ± 0.1 | 2.1 ± 0.1 | 5245459 |
| 700–800 | 14.1 ± 0.1 | -0.4 ± 0.1 | 0.8 ± 0.1 | -5.3 ± 0.1 | 2.1 ± 0.1 | 5272993 |
| 900–1 K | 13.5 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 | -4.1 ± 0.1 | 1.8 ± 0.1 | 5235217 |
| 1.2–1.3 K | 12.8 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | -0.6 ± 0.1 | -3.4 ± 0.1 | 1.2 ± 0.1 | 4741504 |
| 1.5–1.6 K | 12.4 ± 0.1 | -0.2 ± 0.1 | -1.1 ± 0.1 | -3.0 ± 0.1 | 1.4 ± 0.1 | 3871940 |
| 1.8–1.9 K | 11.8 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | -1.2 ± 0.1 | -2.8 ± 0.2 | 1.4 ± 0.1 | 2839861 |
| 2.1–2.2 | 11.1 ± 0.1 | -0.4 ± 0.1 | -1.2 ± 0.1 | -2.5 ± 0.2 | 1.2 ± 0.1 | 1655812 |
| 2.4–2.5 | 10.3 ± 0.1 | -0.7 ± 0.1 | -0.5 ± 0.1 | -2.4 ± 0.2 | 1.2 ± 0.2 | 1041495 |

нием расстояния стремятся к значениям, близким к нулю. Разве только M_{11}^* показывает ненулевые значения (разность сжатия системы по оси X и Y).

Сильнее всего бросается в глаза ход параметра V – скорости движения Солнца вдоль оси Y , направленной по вращению Галактики. Объяснение, вероятно, может быть таким: скорость движения Солнца оценивается относительно групп

звёзд на разных расстояниях, а эти группы сами движутся относительно друг друга, в плоскости Галактики по направлению, перпендикулярному её центру; эти различия сильны и имеют большой систематический ход. Аналогичные результаты получены нами ранее по каталогу Gaia DR2 with RV [22], но поведение параметра V было несколько иным. Его значение оставалось стабильным (около 22 км/с) до расстояний 800 пк, далее начи-

**Рис. 22.** Зависимость кинематических параметров движения Солнца U , V , W от расстояния до звёзд (км/с)

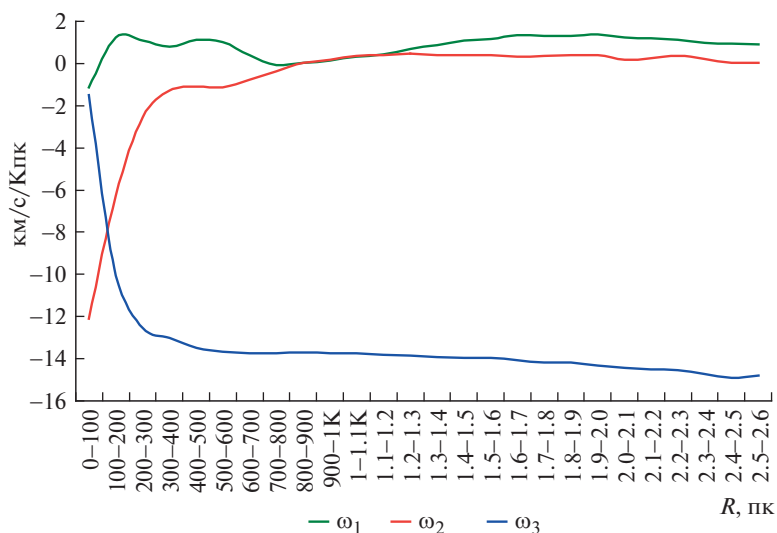


Рис. 23. Зависимость угловой скорости твердотельного вращения ω_1 , ω_2 , ω_3 от расстояния до звёзд (км/с/Кпк)

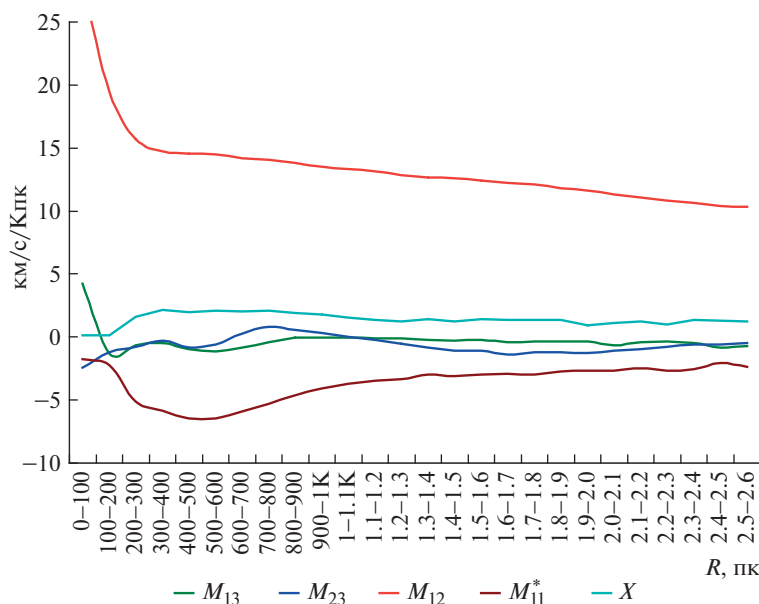


Рис. 24. Зависимость компонент тензора деформации M_{12} , M_{13} , M_{23} , M_{11}^* , X от расстояния до звёзд (км/с/Кпк)

нался линейный рост. В нашем случае мы сразу наблюдаем линейный рост.

Ещё одна особенность параметров движения Солнца — их надёжные и предсказуемые значения даже для самых близких звёзд, чего не скажешь о параметрах вращения и деформации, которые выходят на стабильные значения только с расстояний 400–500 пк.

* * *

Данная работа носит подготовительный характер с прицелом на обработку более точных (особенно в параллаксах) данных финальных

версий каталога Gaia, которые станут доступны в начале 2022 г. Тем не менее даже этот материал даёт богатую почву для различных статистических и кинематических оценок каталога как единого целого.

Дополнительный иллюстративный материал можно получить по ссылке http://school.podvor-ye.ru/astro/GAIA_EDR3/.

ЛИТЕРАТУРА

1. ESA. Gaia. <https://sci.esa.int/web/gaia>
2. ESA. Gaia Early Data Release 3. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/earlydr3>

3. ESA. Gaia Colloboration. Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties // *Astron. & Astrophys.* 2021. V. 649. № A1. P. 1–20.
4. *Michalik D., Lindegren L., Hobbs D.* The Tycho-Gaia astrometric solution. How to get 2.5 million parallaxes with less than one year of Gaia data // *Astron. & Astrophys.* 2015. V. 574. № A115. P. 1–8.
5. *Katz D., Sartoretti P., Cropper M. et al.* Gaia Data Release 2. Properties and validation of the radial velocities // *Astron. & Astrophys.* 2019. V. 622. № A205. P. 1–19.
6. *Zacharias N., Monet D.G., Levine S.E. et al.* The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD). American Astronomical Society 205th Meeting // *Bulletin of the American Astronomical Society*. 2004. V. 36. P. 1418.
7. *Roeser S., Demleitner M., Schilbach E.* The PPMXL Catalog of Positions and Proper Motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and the Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* 2010. V. 139. № 6. P. 2440–2447.
8. *Бартеньев О.В.* Современный Фортран. Изд. 3-е, доп. и перераб. М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2000.
9. Gaia. Chapter 13: https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GEDR3/Gaia_archive/chap_datamodel/
10. *Brown A., Vallenari A., Prusti T. et al.* Gaia Early Data Release 3: Summary of the contents and survey properties // *Astron. & Astrophys.* 2021. V. 649. № A1. P. 20.
11. *Montegriffo P., De Angeli F., Bellazzini M. et al.* Gaia EDR3 passbands. 2020. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/edr3-passbands>
12. *Johnson H.L., Morgan W.W.* Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the Revised System of the Yerkes Spectral Atlas // *Astroph. J.* 1953. V. 117. № 3. P. 313–352.
13. *Цветков А.С.* Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005.
14. *Riello M., De Angeli F., Evans D.W. et al.* Gaia Early Data Release 3 – Photometric content and validation // *Astron. & Astrophys.* 2021. V. 649. № A3. P. 1–33.
15. *Gorski K.M., Hivon E., Banday A.J. et al.* HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere // *Astroph. J.* 2005. V. 622. № 2. P. 759–771.
16. *Casagrande L., VandenBerg D.* On the use of Gaia magnitudes and new tables of bolometric corrections // *Mon. Not. of the Royal Astron. Soc.: Letters*. 2018. V. 479. № 1. P. L102–L107.
17. *Огородников К.Ф.* Динамика звёздных систем. М.: Физматгиз, 1965.
18. *du Mont B.A.* A three-dimensional analysis of the kinematics of 512 FK4/FK4 Sup. stars // *Astron. & Astrophys.* 1977. V. 61. № 127 P. 127–132.
19. *Рыбка С.П.* Кинематический анализ данных о красных звёздах-гигантах в окрестности Солнца // *Кинематика и физика небесных тел*. 2004. № 5. С. 437–443.
20. *Витязев В.В., Попов А.В., Цветков А.С. и др.* Кинематика звёзд каталога TGAS (Gaia DR1) // *Письма в АЖ*. 2018. № 4. С. 265–276.
21. *Шацова Р.Б.* Асимметрия собственных движений ГС Босса // *Учёные записки ЛГУ*. 1950. № 136. С. 115–165.
22. *Цветков А.С., Амосов Ф.А.* Кинематические параметры поля скоростей звёзд области вокруг Солнца радиусом до 3 Кпк по данным каталога Gaia // *Письма в АЖ*. 2019. № 7. С. 517–528.

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ РОССИИ В ПОЯВЛЯЮЩИХСЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ

© 2022 г. А. И. Терехов

Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

E-mail: a.i.terekhov@mail.ru

Поступила в редакцию 26.05.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 03.08.2021 г.

Статья посвящена библиометрическому анализу развития исследований в двух новых высокотехнологичных направлениях — нанофотонике и квантовой обработке информации. В центре внимания автора — количество рецензируемых публикаций, рассматриваемых на уровне стран и их групп, международная научная кооперация, показатели цитирования. Рассматривается структура международной соавторской сети в квантовой обработке информации, обсуждается ряд аспектов взаимодействия глобальной и национальных научных систем.

С применением библиометрических методов выявлены основные участники исследований по обоим направлениям, оценены их вклад в мировой поток публикаций и доля в нём международных соавторских публикаций. Показано, что рост исследований в период 2000–2017 гг. происходил в большей степени на глобальном уровне, центром притяжения для сотрудничества были страны из группы G7, а в наиболее сплочённое ядро соавторской сети по квантовой обработке информации, помимо G7, вошли Швейцария, Швеция и Россия. Существенно, что по обоим направлениям Россия значительно превзошла целевые показатели как вклада в мировой научный результат, так и доли международных соавторских работ.

Ключевые слова: нанофотоника, квантовая обработка информации, научные исследования, научная кооперация, международная соавторская сеть, библиометрический анализ.

DOI: 10.31857/S0869587322010091

Активное формирование глобальной научной системы с начала 1990-х годов привлекло повышенное внимание учёных к проблемам развития науки, количественному изучению её динамики и структуры, включая конкуренцию и кооперацию, соотношение общемировой и национальных научных систем. Важным объектом интереса стало острое научное соперничество на пе-

реднем крае исследований, в частности, в области нанотехнологий, которое явило наглядный пример научной глобализации. В настоящей статье внимание будет уделено двум быстро развивающимся высокотехнологичным направлениям — квантовой обработке информации (КОИ) и нанофотонике (НФТ), которые пока ещё не получили должного отражения в наукометрической литературе.

Квантовая обработка информации — междисциплинарная область, в рамках которой изучается то, как информация собирается, преобразуется и передаётся на квантовом уровне — в атомах, ионах, фотонах, элементарных частицах и микроскопических твердотельных системах [1]. Квантовые компьютеры, квантовые каналы связи и квантовые датчики представляют собой те устройства, которые способны достигать конечных пределов обработки информации. О последствиях объединения квантовой механики с классической машиной Тьюринга учёные задумались более 40 лет назад [2]. Взрывной интерес к КОИ в



ТЕРЕХОВ Александр Иванович — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ЦЭМИ РАН.

начале 1990-х годов стимулировали несколько совпавших обстоятельств: было показано, что квантовый компьютер мог бы с высокой эффективностью факторизовать, то есть разложить очень большие числа в произведение простых множителей (что важно, например, в криптографии); пришло осознание того факта, что согласно закону Мура усовершенствование компьютеров довольно скоро достигнет квантового предела; ряд достижений физики сделал возможным говорить о построении работоспособных устройств квантовой логики. Кроме того, потребность в безопасных коммуникациях привела к изучению возможности создания защищённых схем квантовой связи.

К началу 2000-х годов идея квантовых вычислений стала представляться практически достижимой, что положило начало мировой гонке за “квантовое будущее”. В её фокусе — стремление к “квантовому превосходству” и создание универсального квантового компьютера. Разработка защищённой квантовой связи, по существу, выдвинулась в число проблем национальной безопасности. Хотя многие из решаемых сегодня задач уже находятся на стадии инженерных решений, по оценкам [1], фундаментальные исследования будут продолжать играть основополагающую роль в этой области.

Нанопотоника — одно из ответвлений нанотехнологий, возникшее в начале 2000-х годов как фронт исследований, относящихся к взаимодействию света с наноструктурированными материалами. Драйвером роста этого направления стали открывшиеся новые возможности в таких приложениях, как светодиоды и солнечные батареи, медицинская терапия и диагностика, ультрабезопасные коммуникации и хранение данных [3], а также в военной сфере [4].

Хотя определённая часть исследований по обоим направлениям не публикуется в открытых источниках, несомненно, полезно рассмотреть процессы формирования их научной основы через призму библиографических баз данных, в частности, наиболее авторитетной в мире политематической базы данных Science Citation Index Expanded (БД SCIE). Здесь представлены результаты библиометрического анализа развития КОИ и НФТ в мире в период 2000–2017 гг. с оценкой вклада и позиций России в этих областях. В центре внимания — публикационная активность на уровне стран/групп стран, международное сотрудничество и цитируемость публикуемых исследований.

Как известно, база данных Web of Science (WoS) выбрана Минобрнауки России в качестве основной для оценивания результатов исследований российских учёных на международном уровне. Согласно указу президента РФ № 599 (от 07.05

2012 г.) была поставлена задача к 2015 г. увеличить долю российских публикаций в этой БД до 2.44%, а по указу № 204 (от 07.05.2018 г.) к 2024 г. Россия должна входить в Топ-5 стран в приоритетных для неё областях научно-технологического развития, в число которых вписываются оба рассматриваемых нами направления [5, пункт 20a]. Ещё один целевой индикатор — “доля статей в соавторстве с иностранными учёными в общем числе публикаций российских авторов, индексируемых в международных системах научного цитирования” — должен достигать к 2024 г. 29.6% [6, приложение 1, пункт 33]. Попытаемся сопоставить эти официальные установки с реальным положением дел в КОИ и НФТ.

С этой целью из БД SCIE извлечены две выборки публикаций (типа *article*, *review*, *proceedings paper*, *letter*): 1) все публикации из тематических журналов по квантовой обработке информации (“*Quantum Information & Computation*”, “*Quantum Information Processing*”, “*International Journal of Quantum Information*”, “*npj Quantum Information*”) и нанопотонике (“*Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*”, “*Journal of Nanophotonics*”, “*Nanophotonics*”); 2) публикации, отобранные из других журналов БД SCIE путём поиска по ключевым терминам. Всего за период 2000–2017 гг. было отобрано 47 694 публикации, релевантные тематике КОИ, и 40 691 — тематике НФТ. Полученные выборки использованы в качестве исходных, необходимые для анализа библиометрические индикаторы рассчитаны с помощью сервисов платформы Web of Knowledge и вычислительных процедур в Excel.

ДИНАМИКА КОЛИЧЕСТВА ПУБЛИКАЦИЙ И ОСНОВНЫЕ УЧАСТНИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно рисунку 1, оба рассматриваемых направления — КОИ и НФТ — показывают достаточно динамичный рост, хотя несколько уступают углеродным наноструктурам. Тем не менее по количеству опубликованных исследований они уже обошли такое укоренившееся направление нанотехнологий, как полупроводниковые наноструктуры.

По каждому из направлений в исследованиях, хотя бы минимально, участвовали более сотни стран, однако значимых участников (с числом публикаций ≥ 100) было гораздо меньше: 46 по квантовой обработке информации и 41 по нанопотонике. Статусный характер обеих научных “гонок” подчёркивает присутствие в лидирующих составах всех промышленно развитых стран из группы G7 (табл. 1 и 2). Пять из них (кроме США и Франции) специализируются в области КОИ (см. табл. 2), в НФТ — только Япония. Более других НФТ занимается Сингапур, за которым

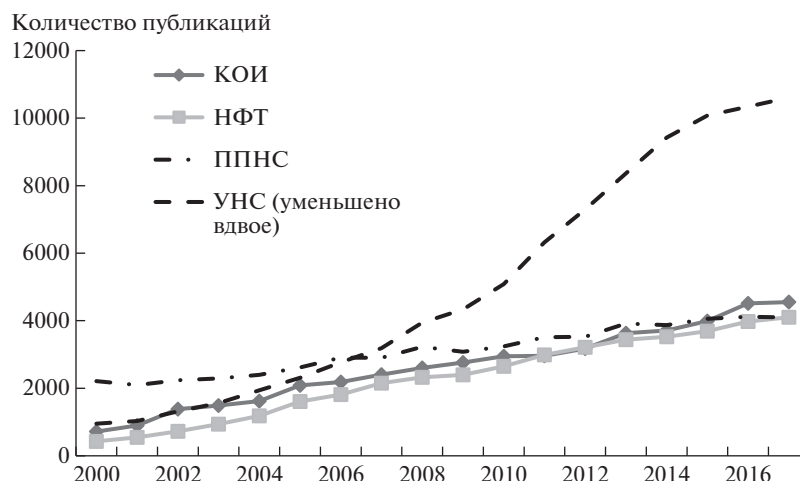


Рис. 1. Сравнительная динамика количества публикаций по квантовой обработке информации (КОИ) и нанوفотонике (НФТ), а также полупроводниковым и углеродным наноструктурам (ППНС и УНС)

Таблица 1. Библиометрические показатели наиболее продуктивных в области НФТ стран (упорядочены по количеству публикаций за период 2000–2017 гг.)

| Место в общем рейтинге стран: за весь период/ в 2017 г. | Страна | Количество публикаций (доля в общем объеме), % | Индекс специализации* | Среднегодовой темп роста (CAGR) в период 2008–2017 гг. | Доля публикаций с международным соавторством, % |
|---|----------------|--|-----------------------|--|---|
| 1/1 | Китай | 11569 (28.4) | 2.2 | 13.3 | 21.5 |
| 2/2 | США | 8846 (21.7) | 0.8 | 4.0 | 38.9 |
| 3/4 | Япония | 3087 (7.6) | 1.1 | –1.0 | 24.0 |
| 4/8 | Германия | 2534 (6.2) | 0.8 | 1.9 | 57.7 |
| 5/7 | Франция | 2399 (5.9) | 1.1 | 1.4 | 53.6 |
| 6/6 | Великобритания | 2376 (5.8) | 0.8 | 3.6 | 62.9 |
| 7/10 | Южная Корея | 1873 (4.6) | 1.4 | 2.7 | 29.6 |
| 8/9 | Россия | 1734 (4.3) | 1.7 | 8.2 | 51.2 |
| 9/16 | Тайвань | 1414 (3.5) | 1.9 | –2.9 | 20.8 |
| 10/3 | Индия | 1373 (3.4) | 0.9 | 18.2 | 16.9 |
| 11/12 | Канада | 1324 (3.3) | 0.8 | 2.8 | 41.5 |
| 12/14 | Италия | 1287 (3.2) | 0.7 | 4.4 | 55.4 |
| 13/15 | Испания | 1209 (3.0) | 0.8 | 0.4 | 56.2 |
| 14/11 | Сингапур | 1127 (2.8) | 3.8 | 7.3 | 63.5 |
| 15/13 | Австралия | 1088 (2.7) | 0.8 | 11.4 | 60.3 |
| 16/5 | Иран | 999 (2.5) | 1.8 | 24.9 | 15.2 |
| — | Весь мир | 40691 (100.0) | 1 | 6.5 | — |

* Индекс специализации (I_{spec}) — сравнение доли статей какой-либо страны в данной области с её долей в науке в целом. $I_{\text{spec}} > 1$ (1 — среднемировое значение) означает, что данная страна специализируется в указанной области.

следуют Китай и Тайвань; наибольшие же среднегодовые темпы роста (CAGR) за последние девять лет демонстрируют Иран, Индия и Китай

(см. табл. 1). Благодаря этому в нанوفотонике выделяется группа азиатских стран (Индия, Иран, Китай, Сингапур, Тайвань, Южная Корея

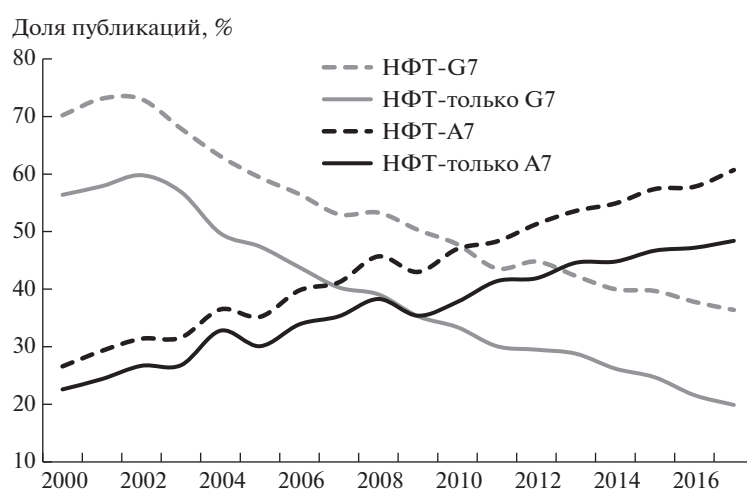
Таблица 2. Библиометрические показатели наиболее продуктивных в области КОИ стран (упорядочены по количеству публикаций за период 2000–2017 гг.)

| Место в общем рейтинге стран: за весь период/в 2017 г. | Страна | Количество публикаций (доля в общем объеме), % | Индекс специализации | Среднегодовой темп роста (CAGR) в период 2008–2017 гг. | Доля публикаций с международным соавторством, % |
|--|----------------|--|----------------------|--|---|
| 1/1 | Китай | 12004 (25.2) | 2.0 | 7.5 | 22.1 |
| 2/2 | США | 11 298 (23.7) | 0.9 | 6.7 | 48.1 |
| 3/3 | Германия | 5019 (10.5) | 1.4 | 8.7 | 67.4 |
| 4/4 | Великобритания | 4411 (9.2) | 1.2 | 8.2 | 65.9 |
| 5/5 | Япония | 3651 (7.7) | 1.1 | 4.3 | 43.4 |
| 6/6 | Канада | 2871 (6.0) | 1.4 | 5.4 | 69.7 |
| 7/7 | Италия | 2838 (6.0) | 1.3 | 5.2 | 55.2 |
| 8/8 | Франция | 2064 (4.3) | 0.8 | 9.8 | 65.4 |
| 9/9 | Австралия | 2057 (4.3) | 1.3 | 7.1 | 64.4 |
| 10/10 | Испания | 1762 (3.7) | 1.0 | 13.4 | 72.8 |
| 11/11 | Россия | 1558 (3.3) | 1.3 | 12.6 | 48.1 |
| — | Весь мир | 47694 (100.0) | 1 | 6.4 | — |

и Япония — условно назовём эту группу стран А7), способная по объёму исследований конкурировать с развитыми странами Запада. Публикационный вклад G7 и А7 за весь период в НФТ примерно одинаков: 48 и 50% соответственно; однако группа А7 более замкнута: 83% публикаций подготовлены без внешних партнёров, тогда как в группе G7 — 69%. Динамика соперничества этих групп показана на рисунке 2, который свидетельствует, что с 2009 г. А7 перехватила лидерство. Рисунок также подтверждает, что группа G7 бо-

лее открыта к сотрудничеству с остальным миром, хотя к концу периода международная кооперация А7 стала заметно возрастать.

В КОИ ситуация несколько иная: вклад группы G7 больше (55% за весь период и 70% в его начале), отсутствует конкурирующая группа стран. Вероятно, здесь существует более высокий, чем в НФТ, научно-технический порог для исследовательской деятельности, поскольку, например, все азиатские страны из таблицы 1 имеют по КОИ

**Рис. 2.** Динамика публикационного вклада групп стран G7 и А7 в нанотехнологии

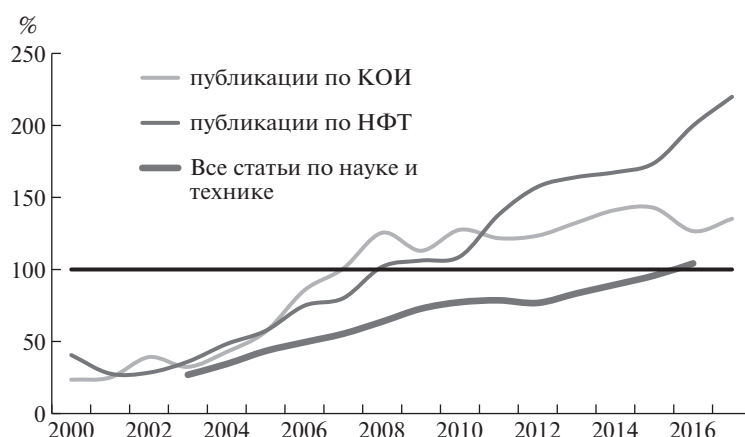


Рис. 3. Процент китайских публикаций от уровня США (данные для расчёта нижней кривой взяты из [10, Appendix table 5–27])

большую долю совместных публикаций, а рейтинговые позиции стран менее подвержены скачкообразным изменениям.

Показательно соперничество в верхнем эшелоне между Китаем и США. Из рисунка 3 видно, что КНР удалось сосредоточить усилия на двух рассматриваемых направлениях, за счёт чего по количеству публикаций по этой тематике республика обошла США на 8–9 лет раньше, чем по общему объёму научно-технических публикаций. Значительный вклад в исследования внесла Китайская академия наук (16% всех национальных публикаций по НФТ и 25% — по КОИ) — лидер среди аналогичных научных организаций мира. Важную роль в НФТ сыграла Оптическая долина Китая (ОДК), научно-исследовательской и инновационной базой которой выступает Национальная лаборатория оптоэлектроники, а также принятая в 2009 г. целевая программа по привлечению в ОДК научных талантов, в том числе из-за рубежа. Вступив в “квантовую гонку” в 2004 г., Китай в 2013 г. успешно провёл эксперимент по квантовым коммуникациям на расстоянии более 100 километров, а в августе 2016 г. запустил первый в мире спутник квантовой связи [7]. По количеству публикаций в области квантовой связи за 2000–2017 гг. Китай опередил США, однако по тематике квантовых вычислений несколько уступил им. Тем не менее в конце 2020 г. китайские учёные добились “квантового превосходства” при решении задачи отбора проб бозона с помощью фотонного квантового компьютера [8]. Такому прогрессу, очевидно, способствует обильное финансирование исследований, по объёму которого Китай превосходит другие страны [9].

В обоих направлениях у России свои исторические вехи: созданные в советские годы научные школы в области оптики и наноструктурированных материалов позволили нашим учёным с са-

мого начала успешно включиться в исследования по НФТ. Известны ранние результаты в области КОИ сотрудников Математического института им. В.А. Стеклова и Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН. Среди них можно назвать А.С. Холево — теорему Холево, позволяющую определить верхнюю границу количества классической информации, которую можно извлечь из ансамбля квантовых состояний с помощью квантовых измерений (1973); Ю.И. Манина, который в 1980 г. одним из первых предложил идею квантового компьютера; А.Ю. Китаева, разработавшего концепцию топологического квантового компьютера в 1997 г. В период 2000–2017 гг. Россия специализировалась как в исследованиях по нанопотонике, так и по квантовой обработке информации, причём в первом направлении добились больших успехов ($I_{\text{spec}} = 1.7$), чем во втором ($I_{\text{spec}} = 1.3$). Соответствующим был и вклад российской науки в мировые публикационные результаты по каждому из направлений (4.3 против 3.3%) (см. табл. 1 и 2). На долю РАН приходилось 59% всех российских публикаций в области НФТ и 58% — в КОИ, то есть оба направления развивались у нас преимущественно в академическом секторе. Тем не менее в последние годы университеты обошли РАН по удельному показателю, особенно заметно — в нанопотонике. Позиции России в рейтингах стран (см. табл. 1 и 2, столбец 1) выглядят достаточно устойчиво. Более того, если пролонгировать существующие величины CAGR в НФТ (см. табл. 1, столбец 4), то к 2024 г. Россия гипотетически могла бы войти в Топ-5 стран по данному направлению (о КОИ этого сказать нельзя). Вероятно, однако, что целый ряд стран будет наращивать исследовательские усилия, тогда как в нашей стране для этого существуют препятствия. Наиболее серьёзным ограничителем конкурентных возможностей,

Таблица 3. Доля международных соавторских публикаций по трём направлениям

| Научное направление | Доля международных соавторских публикаций, % | | |
|---------------------|--|---------|---------------|
| | 2000 г. | 2017 г. | 2000–2017 гг. |
| КОИ | 25.7 | 34.7 | 31.4 |
| НФТ | 19.9 | 26.7 | 23.6 |
| Нанотехнологии | 23.1 | 26.8 | 23.5 |

особенно в новых высокотехнологичных областях, остаются кадровые проблемы, о которых было известно ещё в начале 2000-х годов [11], но они так и не нашли адекватного решения.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОАВТОРСТВО И ЕГО СЕТЕВАЯ СТРУКТУРА

Международное научное сотрудничество привлекает всё возрастающий интерес в специальной литературе (публикации в журналах *“Scientometrics”*, *“Research Policy”*, *“Science and Public Policy”* и др., монографических работах, например, [12]), правительственных документах [13, 14], национальных дорожных картах развития НИР [15], аналитических докладах [16, 17]. В наукометрической литературе довольно продуктивным оказалось рассмотрение и анализ глобальной научной системы в форме сети международного научного сотрудничества (соавторства) [12, 18–20]. С начала 1990-х годов эта сеть стала быстро расти за счёт добавления в неё “узлов” (стран) и “рёбер” (соавторства). Если в 1990 г. в БД WoS было выявлено 172 страны, участвующих в исследованиях, и в среднем 11 связей на одну страну, то к 2013 г. их количество увеличилось до 230 и 36 соответственно [12, р. 89]. Анализ социальных сетей показал, что со временем глобальная научная сеть становится плотнее и устойчивее, что влияние внутри сети приобретает более рассредоточенный характер и возрастающее число “узлов” становится частями групп, а не спутниками крупных научных конгломератов [12, р. 89, 90].

Закономерный вопрос о соотношении глобального и национального факторов развития науки, глобальной и национальных научных систем с наукометрических позиций рассмотрен в работах [18, 19]. С помощью сетевого и факторного анализа международных соавторских связей на массивах публикаций WoS за 1990 и 2000 гг. было подтверждено, что глобальная научная сеть обладает свойством самоорганизации (отсутствует центральный орган, направляющий развитие международной науки) и по крайней мере какая-то её часть растёт независимо от национальных научных систем и в ином направлении [18]. В статье [19] сделан следующий шаг: добавив из БД WoS данные за 2011 г., авторы выполнили статистиче-

скую проверку влияния глобальной сети на национальные исследования. На основе сравнения распределений международно-соавторских и внутренних публикаций по институтским адресам с помощью расхождения Кульбака–Лейблера для 61 страны было проверено, может ли слой первых считаться предиктором для модели вторых или же имеет место обратное. В частности, показано, что для США, Китая, России международное распределение публикаций является лучшим предиктором развития науки на национальном уровне, а не наоборот, тогда как для Великобритании национальная модель оказалась более сильной [19]. На основе предложенной методологии выполнено картирование влияния глобальной научной сети, однако вследствие высокой степени агрегирования полученные выводы требуют дальнейшей проверки и уточнений на уровне стран. Например, в работе [20] с помощью оригинального подхода по-новому рассмотрена эволюция места Китая в глобальной сети, а в [21] эмпирически показано, что “исследовательский портфель” России в области углеродных наноструктур в 2000-е годы существенно отличался от мирового.

Глобальная научная сеть продолжает развиваться, и несомненный интерес представляет изучение её частей, связанных с появляющимися направлениями. Из таблицы 3 следует, что, несмотря на, казалось бы, высокую конфиденциальность исследований, доля международных соавторских публикаций в КОИ и НФТ довольно высока, причём её увеличение за 2000–2017 гг. (на 9 в КОИ и 6.8 процентных пункта в НФТ) говорит о том, что расширение фронта исследований происходило в большей степени на глобальном уровне. Более быструю интернационализацию сотрудничества в нанотехнологии, по сравнению с нанотехнологиями, из которых она родилась (см. табл. 3), вероятно, можно рассматривать как особенность складывающегося направления. Сети международного соавторства развивались весьма динамично по обоим направлениям: так, с 2000 по 2017 г. число стран-участниц исследований в области НФТ выросло с 40 до 109, тогда как число связей, приходящихся в среднем на одну страну, – с 4 до 20; рост этих показателей по КОИ составил: с 47 до 109 и с 5 до 22.

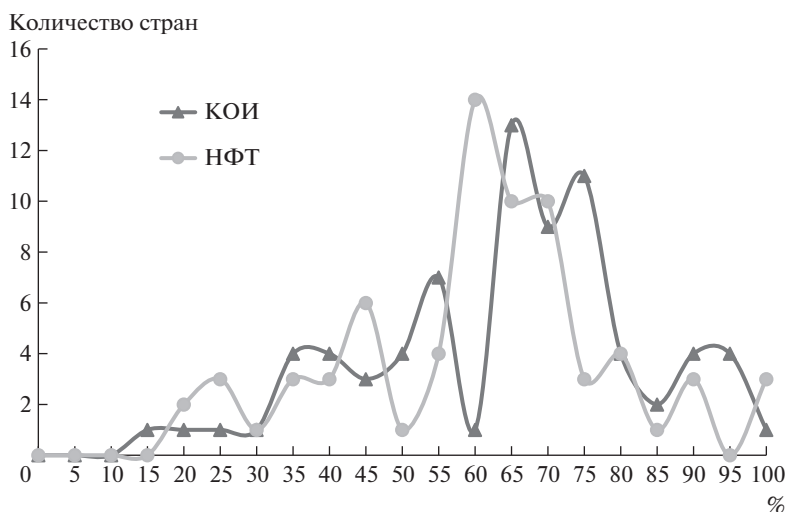


Рис. 4. Распределение стран с более чем 10 публикациями в нанотехнологиях (НФТ) и квантовой обработке информации (КОИ) по проценту публикаций с международным соавторством

Можно отметить особенности, характерные для разных стран: например, в Великобритании, Германии и США число внутренних публикаций по нанотехнологиям в последние годы стабилизировалось (или даже снижается), а увеличение их общего годового выпуска полностью связано с международным сотрудничеством; в Китае бурный рост публикаций происходит преимущественно за счёт внутренних исследований; в России же драйверами общего роста примерно в равной мере выступают оба фактора — внутренний и внешний. Для Великобритании, Германии, Китая и России аналогичная картина наблюдается и по направлению КОИ, однако для США роль внутреннего и международного факторов публикационного роста, в отличие от НФТ, примерно одинакова.

В случае КОИ распределение стран по доле международных соавторских публикаций сходно по форме с некоторым сдвигом в сторону больших значений (рис. 4). Сравнение распределений с учётом количества производимых странами публикаций показало: к большей международной кооперации в области КОИ склонны крупные игроки, что ещё раз говорит о наличии здесь более высокого порога для участия в исследованиях.

Из рисунка 2 следует, что общую динамику сотрудничества в области НФТ определяет наличие двух довольно замкнутых групп стран — G7 и A7. В соответствии с индексом Солтона¹ наиболее

сильные соавторские связи имели следующие пары стран из таблицы 1: Китай—Сингапур ($IS = 0.108$), США—Китай (0.095), Германия—Россия (0.08), Франция—Италия (0.077), Великобритания—Германия (0.072), США—Германия (0.068), Великобритания—Франция (0.067), США—Италия (0.063) и Великобритания—Сингапур (0.063), причём первая, третья и четвёртая пары стран были друг для друга предпочтительными партнёрами. В четвёрку наиболее предпочтительных партнёров для России вошли ведущие западные страны: Германия, США, Великобритания и Франция, на долю которых совокупно приходится 53% международных соавторских публикаций отечественных учёных, а только на них (без третьей стороны) — 30%.

Структуру связей могут косвенно отражать и показатели цитирования. Согласно расчётам, наиболее часто российские НФТ-публикации цитируют американцы, несколько реже — китайцы. Добавим, что с 2008 по 2016 г. среднее число ссылок на одну российскую публикацию показательно выросло: для всех ссылок в 1.8 раза, тогда как для «американских» и «китайских» — в 2.6 и 3.3 раза соответственно. В структуре цитирований отечественных работ весомо представлены другие ведущие страны Запада, а в последние годы стали заметны Австралия и Сингапур. Рисунок 5 показывает большую представленность четырёх ведущих западных стран в структуре статей, цитирующих российские НФТ-публикации, нежели китайские², причём соответствующая кри-

¹ Индекс Солтона — не имеющий размерности показатель силы сотрудничества. Для пары стран он рассчитывается путём деления числа их соавторских публикаций на среднее геометрическое число всех публикаций каждого из партнёров. Впервые в библиометрической практике предложен в работе [22], впоследствии стал активно применяться при анализе сетей международного соавторства [23].

² В БД WOS проследить авторство цитирующей статьи значительно проще, чем авторство цитаты. Однако использование цитирующих статей вместо цитат приводит к некоторому смещению оценок, поскольку одна такая статья может содержать ссылки на несколько публикаций из оцениваемого массива.

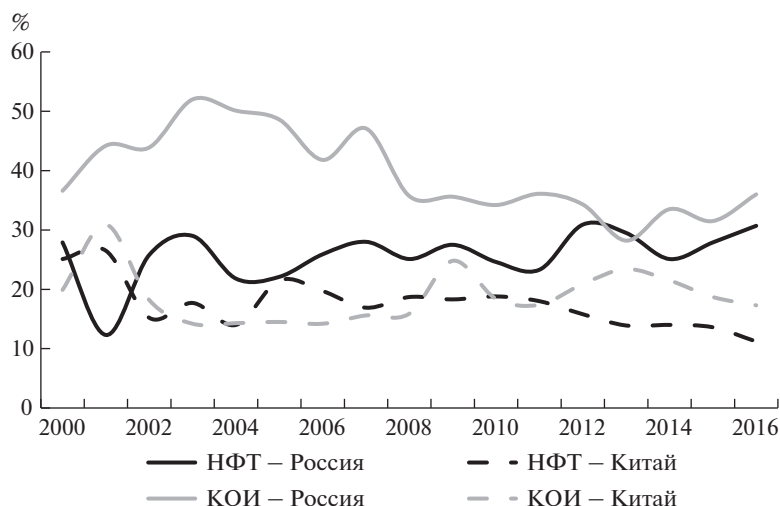


Рис. 5. Доля четырех западных стран в структуре цитирующих статей для российских и китайских публикаций по нанотехнологиям (НФТ) и квантовой обработке информации (КОИ)

вая для российских публикаций имеет в последние годы повышательный тренд. Все сказанное подтверждает, что результаты российских учёных достаточно востребованы.

Проанализируем детальнее, как более интересную, сеть соавторских связей в области КОИ, ключевыми в которой выступают 46 стран, имеющих более ста публикаций³. Сеть обладает высокой плотностью — ~76%. Максимальную долю связей с другими странами, или нормированную степень центральности, равную 1, в ней имеют США, Италия и Япония. Далее, по убыванию этого показателя, следуют Германия, Великобритания и Канада (0.98), Франция и Испания (0.96) и т.д., заканчивая Марокко (0.29). Показатель России — 0.89. Нормированная степень центральности всей сети⁴ равна 0.25, что свидетельствует о её слабой централизации⁵. Рассмотрим теперь силу соавторских связей стран, используя индекс Солтона. Согласно расчётам, наиболее сильные соавторские связи сложились между: Египтом и Саудовской Аравией ($IS = 0.371$), Чехией и Сло-

вакией (0.187), США и Канадой (0.149), Египтом и Малайзией (0.127), Великобританией и Сингапуром (0.122), Германией и Испанией (0.119), Германией и Австрией (0.117), Германией и Великобританией (0.109), Саудовской Аравией и Марокко (0.109), Великобританией и Италией (0.105). Остальные значения IS не превышают 0.1.

Разобьём совокупность соавторских связей, согласно IS , на четыре примерно равных слоя с помощью квартилей. Обозначим по порядку: S_1 — первый (или нижний, с наименьшими значениями IS), S_2 — второй, S_3 — третий и S_4 — четвёртый (или верхний, с наибольшими значениями IS) квартильные слои. Первостепенный интерес представляет обнаружение групп тесно сотрудничающих стран. Проведённый анализ, в частности, показал:

- десять стран (члены G7, а также Россия, Швейцария и Швеция) образуют в S_4 наибольшую клику⁶, то есть представляют подгруппу стран с внутренне устойчивыми соавторскими связями в области КОИ. Вхождение России в данную подгруппу (наиболее сплочённую часть сети) особенно показательным на фоне того, что экономическое сотрудничество партнёров по БРИКС пока не сопровождается заметным усилением их научной кооперации: хотя члены блока имеют соавторские связи по КОИ, они пока ещё довольно слабы (принадлежат к слою S_2). Принадлежность российских исследователей к сильнейшей клике косвенно свидетельствует о достаточно высоком уровне отечественных исследований. Характер научных связей России подтверждает и структура цитирования её работ. Согласно рисунку 5, доля четырех ведущих стран

³ В порядке убывания количества публикаций в области КОИ: Китай, США, Германия, Великобритания, Япония, Канада, Италия, Франция, Австралия, Испания, Россия, Швейцария, Польша, Индия, Австрия, Бразилия, Сингапур, Южная Корея, Нидерланды, Израиль, Иран, Швеция, Чешская Республика, Дания, Тайвань, Бельгия, Венгрия, Финляндия, Мексика, Египет, Аргентина, Словакия, Саудовская Аравия, Турция, ЮАР, Чили, Греция, Ирландия, Украина, Португалия, Пакистан, Румыния, Новая Зеландия, Норвегия, Малайзия, Марокко.

⁴ Структурная характеристика всей сети, которая показывает, насколько равномерно распределены степени центральности её узлов, равна 0, когда степень центральности всех узлов одинакова, и 1, когда один узел по степени центральности полностью доминирует в сети. Рассчитывается по формуле Фримана [24].

⁵ Аналогичная сеть для НФТ имеет близкие показатели: плотность ~74%; нормированную степень центральности всей сети ~ 0.27; степень центральности у России ~0.9.

⁶ Клика — термин теории графов. Здесь означает подмножество стран, любые две из которых имеют соавторские связи.

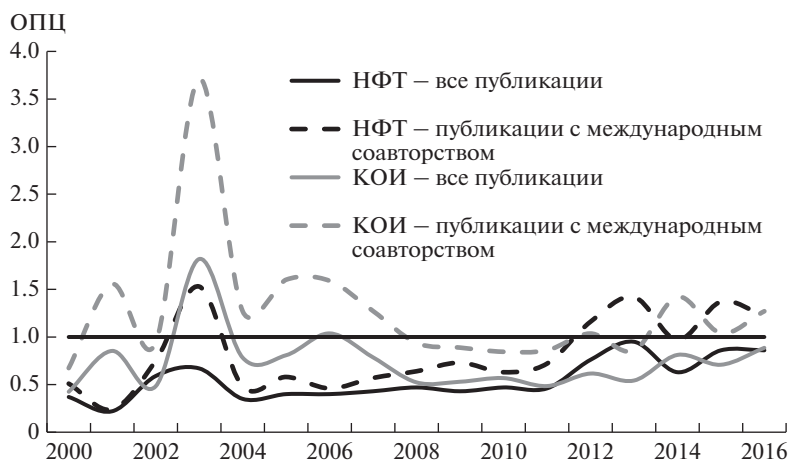


Рис. 6. Научное воздействие российских публикаций относительно среднемирового уровня (жирная горизонтальная линия)

из G7 в структуре статей, цитирующих российские публикации по КОИ, до 2011 г. существенно превышала аналогичную долю по НФТ. На 12.04.2021 г. все отобранные российские публикации были процитированы 42879 раз. Эти цитирования в 26% случаев содержались в работах американских учёных, в 19% — китайских, в 15% — немецких, в 8% — британских, в 7% — японских, в 6% — итальянских и французских, в 5% — канадских. Даже статьи с чисто российским соавторством цитировались преимущественно коллегами из стран G7 и Китая, то есть отечественные исследования по КОИ входят в сферу внимания лидеров;

- высокая плотность (90.6%) характеризует соавторские связи 19 членов ЕС. Среди них выделяется группа из 11 стран (Германия, Великобритания, Италия, Франция, Испания, Польша, Австрия, Нидерланды, Швеция, Дания, Бельгия) с сильными связями, которые на 89% принадлежат к слою S_4 и на 11% — S_3 . С этой группой довольно сильно связаны Чешская Республика и Венгрия, а из стран, не входящих в ЕС, — Швейцария. Слабее всего интегрированы в соавторскую подсеть стран — членов ЕС Румыния, Португалия и Ирландия;

- для азиатских стран, включая Египет, характерно преобладание более слабых внутригрупповых соавторских связей: 65% из них принадлежат к слоям S_1 и S_2 . По силе перекрёстной кооперации (например, с 11 выделенными странами ЕС, США и Канадой) азиатские страны можно поделить на две подгруппы: первая — Китай, Япония, Индия, Сингапур, Южная Корея, Израиль, вторая — Иран, Тайвань, Египет, Саудовская Аравия, Пакистан, Малайзия. У первой преобладают более сильные перекрёстные связи (на 85% из слоёв S_4 и S_3), у второй — более слабые (на 68% из слоёв S_1 и S_2). Наиболее тесно с западными странами сотрудничают Сингапур и Япония, наименее — Пакистан и Малайзия. Таким образом, европейские страны, за некоторым исключением, демонстрируют значительно большую внутрен-

нюю сплочённость (о чём уже говорилось выше), чем азиатские, часть из которых тяготеет к сотрудничеству с западными партнёрами;

- примеры сочетания локальных и глобальных соавторских связей в слоях S_4 и S_3 — латиноамериканский четырёхугольник Бразилия—Мексика—Аргентина—Чили, который входит в максимальную клику из девяти стран вместе с Испанией, США, Германией, Италией и Францией; скандинавский треугольник Швеция—Финляндия—Норвегия, который входит в крупную клику вместе с США, Германией, Испанией, Россией, Польшей и Данией. Новая Зеландия вместе со своим географическим соседом Австралией входят в максимальную клику (семь стран) слоёв S_4 и S_3 , которая включает также Норвегию, США, Германию, Россию и Данию. Довольно сплочённую группу (клику в S_4 и S_3) образуют четыре страны бывшего социалистического лагеря (Польша, Венгрия, Чехия и Словакия), которая входит в максимальную клику (12 стран) вместе с США, Германией, Великобританией, Японией, Францией, Швейцарией, Австрией и Данией;

- согласно индексу Солтона, наиболее предпочтительными партнёрами для России выступают Германия, США, Франция, а также Норвегия и Украина. У двух последних стран Россия в порядке партнёрских предпочтений на первом и втором местах соответственно, что может говорить о высокой обоюдной склонности к сотрудничеству.

В библиометрической литературе имеются многочисленные подтверждения положительного влияния соавторства (в том числе международного) на цитируемость публикаций [25]. Рисунок 6 демонстрирует научное влияние российских публикаций через относительный показатель цитирования (ОПЦ)⁷. Из сопоставления графиков

⁷ ОПЦ показывает выше или ниже среднемирового уровня (=1.0) цитируются публикации данной страны.

следует, что отечественные публикации по КОИ (за небольшим исключением) имеют больший научный эффект, чем публикации по НФТ; международное соавторство в обоих случаях вносит заметный вклад в цитируемость на уровне отдельной публикации, приближая её к среднемировому показателю в последние годы.

При подсчёте цитат в пятилетнем окне установлено: международное соавторство повышает цитируемость отечественных работ по КОИ в среднем в 3.5, а по НФТ — в 2.9 раза. Аналогичные показатели составляют: для Китая — 2.2 (2.0), Германии — в 1.5 (1.4), США — в 1.3 (1.1) раза. Таким образом, международное соавторство в той или иной степени выгодно всем странам, причём для КОИ преимуществ оказывается больше. Последнее может означать, что важные научные события по этому направлению с большей вероятностью происходят на глобальном уровне.

Кратко подытожим:

- за рассматриваемый период как по квантовой обработке информации, так и по нанопотонике исследовательская активность в большей мере проявлялась на глобальном уровне: свыше трети мировых публикаций по КОИ и четверти по НФТ в 2017 г. принадлежали международным соавторским коллективам; доля соавторских работ для стран с количеством от 10 статей имела диапазон концентрации 65–75% по КОИ и 60–70% по НФТ, причём по первому направлению к кооперации оказались более склонны крупные игроки, чем по второму;

- расширение сетей международного соавторства происходило весьма динамично: по КОИ, например, число стран-участниц исследований увеличилось за 2000–2017 гг. в 2.3 раза, а число соавторских связей в среднем на одну страну — в 4.4 раза. Структуру соавторской сети 46 значимых игроков по этому направлению характеризуют: высокая плотность и небольшая степень централизации; наличие ядра особенно тесно связанных между собой стран Европы и Северной Америки; сочетание локальных и глобальных соавторских связей (латиноамериканский четырёхугольник и скандинавский треугольник); значительно большая сплочённость европейских стран по сравнению с азиатскими, часть из которых сильнее тяготеет к сотрудничеству с западными партнёрами;

- Россия вместе с членами G7, Швейцарией и Швецией входит в наиболее сплочённое ядро сети, имея в качестве предпочтительных партнёров Германию, США и Францию. Западные коллеги обеспечивают и большую часть ссылок на отечественные КОИ- и НФТ-публикации, что ещё раз подчёркивает интегрированность российских исследований в мировые. Участие в международной кооперации заметно увеличивает цитируемость российских работ, повышая их глобальную видимость;

- сказанное в отношении КОИ в значительной мере относится и к НФТ; наиболее заметное отличие нанопотоники — в существовании двух конкурентных по объёмам исследований блоков стран — условно Запада и Востока, которое она унаследовала от нанотехнологий [26].

Выполненный анализ с применением библиометрических и сетевых методов позволяет сделать ряд выводов.

1. Оба направления — КОИ и НФТ — развиваются динамично, но без признаков бума, характерного, например, для графена. Если судить по доле публикаций в таких престижных изданиях, как журналы серии “*Nature*”, а также “*Science*” и “*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*” (3.8% в КОИ и 1.2% в НФТ по сравнению с 1.4% для графена), они в фокусе внимания мирового научного сообщества. Это подтверждает и состав ведущих участников исследований, среди которых страны — члены G7 и лидирующий в обоих направлениях Китай. После 2009 г. определяющую роль в формировании исследовательского ландшафта в НФТ стала играть группа азиатских стран. По КОИ семь последующих мест за Китаем занимают представители группы G7, причём отставание США от Китая заметно меньше, чем по НФТ.

2. За последние годы Китай создал десятки университетов мирового класса по западному образцу, осуществил массированную подготовку научных кадров, в том числе путём отправки студенческой молодёжи для обучения за рубежом, а позже реализовал масштабный план по возвращению отечественных и привлечению иностранных научных талантов в страну [27]. Довольно эффективной оказалась, например, высоко селективная “программа 3551 талант Оптической долины”, направленная на привлечение мировых лидеров и молодых исследователей для работы в ряде областей по профилю Оптической долины Китая. Эти меры, наряду с усиленным финансированием науки, позволили КНР выиграть научное соревнование по ряду прорывных направлений, включая КОИ, НФТ, нанотехнологии и т.д., создав тем самым прочный научно-технологический задел на будущее. Эта ситуация очень показательна.

3. В последние десятилетия всё большая часть научных исследований в мире осуществляется на основе международной кооперации, причём в таких передовых направлениях, как КОИ и НФТ, эта тенденция особенно заметна. Всё новые страны включаются в исследования, формируются двух- и многосторонние международные команды учёных, на долю которых в 2017 г. пришлось почти 35% всех публикаций в области КОИ. Ведущие мировые университеты и НИИ — Калифорнийский и Гарвардский университеты, Массачусетский технологический институт (США), Научно-технический университет, Университет

Цинхуа, Джэцзянский университет (Китай), Оксфордский, Кембриджский, Саутгемптонский университеты (Великобритания), МГУ, ФИАН, Университет ИТМО (Россия) и др. — стали активными участниками международного сотрудничества. Для сформировавшейся соавторской сети в области КОИ характерно наличие сплочённого ядра стран, включающего членов группы G7, Швейцарию, Швецию и Россию; из азиатских стран к ним ближе всего примыкает Сингапур. Центром притяжения G7 выступает и в соавторской сети по НФТ. Так, представители стран группы A7 имеют с коллегами из группы G7 в 3.4 раза больше соавторских связей, чем друг с другом; для остального мира (без G7 и A7) соответствующее соотношение равно 2.4. В то же время, A7 и остальной мир связаны друг с другом намного слабее, чем с группой G7. Отсюда, в частности, следует, что промышленно развитые западные страны, обладая мощной системой исследовательских университетов, остаются главным драйвером научной глобализации.

4. По КОИ Россия входит в упомянутое ядро, а в области НФТ наиболее тесно связана с четвёркой ведущих западных стран. Учитывая слабость наших научных связей с партнёрами по БРИКС, можно сказать, что интеграция отечественной науки в мировую продолжается в основном за счёт западного направления. Этому способствуют не только исторические традиции, но и тот факт, что Запад — преимущественное место притяжения российской научной диаспоры. С 2006 г. у нас началась модернизация вузовской системы (создание и поддержка исследовательских университетов, перенос в них центра тяжести фундаментальных исследований), предпринята попытка реинтеграции научной диаспоры, привлечения в страну известных зарубежных учёных (программа мегагрантов). Однако исторические условия для реформирования научно-образовательной систем у нас и в Китае сложились по-разному. В России реформирование началось после кадрового опустошения науки в 1990-е годы, сопровождавшегося негативными демографическими процессами [11]. Новый виток политизации мировой науки стал раскручиваться с 2016 г. (с приходом к власти в США Д. Трампа), когда с момента начала реформ в Китае прошло более 35 лет, а в России только 10. Всё перечисленное существенно ограничивает возможности нашей страны. Нарастив публикационный вклад и долю международно-соавторских статей, Россия досрочно превзошла в КОИ и НФТ установленные задания по этим показателям: 2.44% и 29.6% соответственно. Однако для вхождения в топ-5 стран по КОИ первый показатель в 2017 г. должен был равняться 6.7%, а не 3.8%. Кадровый дефицит в сочетании с политически мотивированными ограничениями международного сотрудниче-

ства может стать для нас основным препятствием в достижении поставленной цели. С 2014 по 2020 г. доля международно-соавторских публикаций России выросла примерно с 35 до 41%, а с четвёркой ведущих стран Запада — с 21 до 22%. Некоторое снижение показателя отмечалось только в кооперации с четырьмя западными странами без участия третьей стороны — с 10.3 до 8.7%.

Можно заключить, что глобальная научная сеть объективно существует и положительно влияет на развитие и качество исследований, разработку прорывных направлений. Она способствует развитию национальных научных систем, подготовке высококвалифицированных кадров. Но есть и обратная сторона медали: глобальная повестка навязывается в ущерб решению насущных внутренних проблем (что особенно характерно для социогуманитарных наук), продолжается утечка идей, умов и инвестиций. А значит, требуется взвешенный подход к взаимодействию национальной и глобальной научных систем, которое должно порождать синергетический эффект — Китай сумел его добиться в полной мере [27].

В последние годы вслед за ростом международной напряжённости, особенно в отношениях между США и Китаем, заметно усилилась политизация науки, запуская процессы деглобализации. Так, в начале 2020 г. китайские власти анонсировали введение новой национально ориентированной системы оценки научных исследований, предусматривающей отказ от использования индексов научного цитирования от Clarivate Analytics [28]. Даже если в других странах всё останется по-прежнему, этот шаг Китая может вызвать заметное сокращение международного сотрудничества, хотя бы потому, что в последние годы именно учёные США и Китая подготовили самое большое число совместных публикаций (в БД SCIE 46.5 тыс. в 2017 г. и 61.1 тыс. в 2020 г.). Однако пока никаких обвалов не наблюдается: Китай и США по-прежнему остаются предпочтительными партнёрами друг для друга; индекс Солтона у них достаточно высок и колеблется незначительно.

А что же Россия? Перенеся фокус с академического сектора на университетский, мы не прошли того реформаторского пути, который проделал Китай за несколько благоприятных десятилетий. Учитывая длительное недофинансирование отечественной науки и кадровый кризис, нам не под силу делать ставку на автономизацию исследований без риска оказаться на обочине, особенно в высокотехнологичных областях. Успешное восприятие передового научного знания [29], активный вклад в определение международной научной повестки [14] невозможны без участия в совместных исследованиях, развивающихся на переднем крае науки.

ЛИТЕРАТУРА

- Future Directions of Quantum Information Processing / A Workshop on the Emerging Science and Technology of Quantum Computers, Communication, and Measurement. US, Virginia, 2017. https://basicresearch.defense.gov/Portals/61/Documents/future-directions/Future_Directions_Quantum.pdf?ver=2017-09-20-003031-450 (дата обращения 05.05.2021).
- Quantum Information Science. An Emerging Field of Interdisciplinary Research and Education in Science and Engineering / Report of the NSF Workshop. US, Virginia, 1999. <https://www.nsf.gov/pubs/2000/nsf00101/nsf00101.pdf> (дата обращения 05.05.2021).
- Editorial. The hidden face of nanophotonics // Nature Photonics. 2011. V. 5. № 7. P. 379.
- Nanophotonics: Accessibility and Applicability. Chapter 4: Potential military applications of nanophotonics. 2008. <https://www.nap.edu/read/11907/chapter/6> (дата обращения 05.05.2021).
- Указ Президента РФ № 642 от 01.12.2016 г. “О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации”. <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf> (дата обращения 05.05.2021).
- Постановление Правительства РФ № 377 от 29.03.2019 г. Государственная программа “Научно-технологическое развитие Российской Федерации”. <http://static.government.ru/media/files/AAVpU2sDAVMQkIHV20ZJZc3MDqcT8x.pdf> (дата обращения 05.05.2021).
- Herman A. Winning the race in quantum computing // American Affairs. 2018. № 2. P. 96–113.
- Zhong H., Wang H., Deng Y., Chen M. et al. Quantum computational advantage using photons // Science. 2020. V. 370. № 6523. P. 1460–1463.
- Erwin S. Pentagon sees quantum computing as key weapon for war in space. July 15, 2018. <https://spacenews.com/pentagon-sees-quantum-computing-as-key-weapon-for-war-in-space/> (дата обращения 05.05.2021).
- National Science Board. Science and Engineering Indicators 2018. Arlington, VA: National Science Foundation, 2018.
- Терехов А.И. Научные кадры — непреходящая ценность // Вестник РАН. 2002. № 7. С. 582–587.
- Wagner C.S. The Collaborative Era in Science. London: Palgrave Macmillan, 2018. <https://www.palgrave.com/gp/book/9783319949857> (дата обращения 10.03.2021).
- Балякин А.А., Задорина А.К., Куклина И.Р. и др. Позиционирование международного научно-технического сотрудничества в правовых документах стран-участников научной глобализации // Вестник РУДН. Серия: Социология. 2018. Т. 18. № 4. С. 651–667.
- Дёжина И.Г., Ключарёв Г.А. Российские концепции международного научно-технического сотрудничества: смена драйверов развития // Социология науки и технологий. 2020. № 4. С. 51–68.
- UK Research and Development Roadmap. London: HM Government, July 2020. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/896799/UK_Research_and_Development_Roadmap.pdf (дата обращения 05.05.2021).
- China's International Scientific Research Collaboration. China, Beijing: National Center for S&T Evaluation and Clarivate Analytics, 2020. <http://www.ncste.org/uploads/www/201712/200927279unk.pdf> (дата обращения 05.05.2021).
- International Cooperation in Science, Technology and Innovation: Strategies for a Changing World. Report of the Expert Group established to support the further development of an EU international STI cooperation strategy. Brussels: European Commission, 2012. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/60358f36-aafe-4537-8567-32e8597ab350> (дата обращения 05.05.2021).
- Wagner C.S., Leydesdorff L. Mapping the network of global science: comparing international co-authorships from 1990 to 2000 // International Journal of Technology and Globalisation. 2005. V. 1. № 2. P. 185–208.
- Wagner C.S., Park H.W., Leydesdorff L. The continuing growth of global cooperation networks in research: A conundrum for national governments // PLOS ONE. 2015. V. 10. № 7. P. 1–15. e0131816. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131816>
- Zhang Z., Rollins J.E., Lipitakis E. China's emerging centrality in the contemporary international scientific collaboration network // Scientometrics. 2018. V. 116. P. 1075–1091. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2788-5>
- Терехов А.И. Углеродные наноструктуры: наукометрический анализ, 2000–2015 (Ч. 2) // Библиосфера. 2018. № 1. С. 57–65.
- Luukkonen T., Tijssen R.J.W., Persson O., Sivertsen G. The measurement of international scientific collaboration // Scientometrics. 1993. V. 28. № 1. P. 15–36.
- Glanzel W. National characteristics in international scientific cooperation // Scientometrics. 2001. V. 51. № 1. P. 69–115.
- Freeman L.C. Centrality in social networks conceptual clarification // Social Networks. 1979. V. 1. № 3. P. 215–239.
- Adams J., Gurney K.A. The Implications of International Research Collaboration for UK Universities. London: Digital Science, 2016. file:///C:/Users/Allex/Downloads/Digital_Research_Report_Collaboration.pdf (дата обращения 16.05.2021).
- Терехов А.И. Место России в меняющемся нанотехнологическом ландшафте // Международные процессы. 2017. Т. 15. № 1. С. 79–91.
- Marginson S. National/global synergy in the development of higher education and science in China since 1978 // Frontiers of Education in China. 2018. V. 13. № 4. P. 486–512. <https://doi.org/10.1007/s11516-018-0027-8>
- Futao Huang. China is choosing its own path on academic evaluation. 26 February 2020. <https://www.universityworldnews.com/post.php?story=20200226122508451> (дата обращения 16.05.2021).
- Куракова Н.Г., Петров А.Н., Зинов В.Г. Подходы к актуализации научно-технологической политики России в ответ на новые вызовы // Экономика науки. 2020. № 3. С. 138–151. <https://doi.org/10.22394/2410-132X2020-6-3-138-151>

ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАЦИЙ В ПОСТКОЛОНИАЛЬНЫХ ГОСУДАРСТВАХ АФРИКИ

© 2022 г. Д. М. Бондаренко^{a,b}

^a Институт Африки РАН, Москва, Россия

^b Российский государственный гуманитарный университет, Москва, Россия

E-mail: dbondar@hotmail.com

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 12.04.2021 г.

Принята к публикации 31.05.2021 г.

В наше время государства Запады вынуждены отходить от классической концепции нации как культурно целостной общности и искать решение проблемы поддержки единства своих граждан при сохранении культурного многообразия, принесённого в последние десятилетия мигрантами со всего мира. В современных условиях нельзя исключать, что постколониальные государства, большинство из которых поликультурно изначально вследствие уникальной истории образования, окажутся в предпочтительном положении, если откажутся от попыток строительства наций по устаревшей классической западной модели. В то время как необратимая глобализация ассоциируется с модерном (Новым временем), начавшимся на Западе полтысячелетия назад, нациестроительство в современных постколониальных странах показывает, что глобализация никоим образом не синонимична вестернизации, а модерн как исторически обусловленный тип общества и культуры распадается на множество модернов.

Проведённый нами анализ процесса становления наций в трёх постколониальных государствах Африки — Объединённой Республике Танзании, Республике Замбии и Республике Уганде — показал, что сегодня вследствие лучших исторических предпосылок Танзания ближе, чем Замбия и Уганда (и вообще большинство стран субсахарской Африки), подошла к сложению нации как общности сограждан, приверженных единым базовым ценностям, обладающих единой культурой и идентичностью поверх локальных и частных — этнических, региональных, конфессиональных — культур и идентичностей с их системами ценностей, и для которых лояльность одному для всех них национальному государству первична по отношению к обусловленным ими различиям. В Замбии и Уганде же локальные идентичности, особенно трибальные (“племенные”) и этнические, более значимы, чем в Танзании. Однако с учётом глобальной тенденции мультикультурализации, особенно явно проявляющейся сегодня на Западе, не становится ли не менее, если не более перспективным положение не Танзании, а Замбии, Уганды и большинства подобных им постколониальных стран?

Ключевые слова: постколониальное государство, национальное строительство, историко-культурные факторы, модерн, Танзания, Замбия, Уганда.

DOI: 10.31857/S0869587322010030



БОНДАРЕНКО Дмитрий Михайлович — член-корреспондент РАН, доктор исторических наук, профессор, заместитель директора по научной работе ИАФР РАН, профессор РГГУ.

ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОЕ СВОЕОБРАЗИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАЦИЙ В ПОСТКОЛОНИАЛЬНЫХ ГОСУДАРСТВАХ

Нации — феномен эпохи модерна (Нового времени). Первые нации как сообщества сограждан с едиными базовыми ценностями, культурой и идентичностью складывались на Западе в раннее Новое время, в неразрывной связи с вызревaniem других институтов, в итоге составивших фундамент мира модерна: капитализма, современной науки, демократического государства и т.д. Однако неверно было бы полагать, что эти явления,

включая сложение нации, характеризуют Новое время как таковое. В своём виде, обычно воспринимаемом как классический (а часто и как единственно возможный), они сформировались именно в западном мире и характеризуют именно его модель общества модерна.

Такое утверждение основывается на положениях концепции множественных модернов (*multiple modernities*), выдвинутой Ш. Айзенштадтом в начале 2000-х годов и, в частности, подчёркивающей, что “модерн и вестернизация не идентичны друг другу” [1, р. 2]. Взгляд на колониальные и постколониальные общества как на особые формы социокультурной организации, чья уникальность предопределена исторически, хорошо совмещается с концепцией “множественных модернов”. Среди африканистов, вероятно, Дж. и Дж.Л. Комароффы первыми заявили: “Короче говоря, существует много модернов” [2, р. XI]. В сущности, все общества в современном мире так или иначе — общества модерна, поэтому множественные модерны можно понимать как различные вариации модерна (*varieties-of-modernity*) [3, р. 88].

Проблема формирования наций в постколониальных обществах — одна из наиболее тесно связанных с их историческим прошлым и с “субъективной” (конструктивистской), и с “объективной” (фактологической) точки зрения. Она также имеет прямое отношение к вопросу о существовании единственного (западного) модерна или множества модернов. Феномены, которые мы привыкли называть “нациями” и “национальными государствами”, — порождения западного модерна. Но не окажутся ли они более устойчивыми, жизнеспособными, если их конкретные модели будут коррелировать со специфическими чертами модерна в соответствующих социокультурных регионах, коренящимися в особенностях исторических путей этих регионов?

Этот вопрос представляется особенно актуальным, потому что сегодня Запад сам пытается отойти от концепции нации, утвердившейся ещё к концу XVIII в. благодаря в первую очередь Великой французской революции. Ныне западным государствам приходится искать пути решения совершенно иной задачи — поддержания единства граждан государства при сохранении привнесённого мигрантами со всего света культурного многообразия, и это приводит к изменению “изначальной”, “классической” концепции нации. Не единая культурная идентичность, основанная на общей системе ценностей и доминирующая над идентичностями локальными и частными, но равноправное сосуществование множества этнокультурных идентичностей акцентируется ныне как новая базовая национальная ценность, как

источник национального развития в условиях интенсивной глобализации последних десятилетий.

Постколониальные общества — уникальное явление всемирной истории. Они появились в середине XX в. не как итог многовековых внутренних социальных процессов, а в результате образования, недолгого (по историческим меркам) существования и распада колониальных империй европейских стран. Границы колоний отражали прежде всего соотношение сил между державами-метрополиями в том или ином регионе, но не предшествующий ход собственной политической, социальной, экономической и культурной истории его народов. Большинство постколониальных государств вместе с установленными колонизаторами границами унаследовали фундаментальные для колониальных обществ искусственную усложнённость социальной системы, экономическую и культурную неоднородность. Постколониальные государства есть наследие колониализма в том отношении, что, когда колонизаторы уходили, мир уже был “глобальным”. Собственно, он и стал таковым окончательно и бесповоротно благодаря освоению мира европейцами, начиная с эпохи Великих географических открытий, ставшей одновременно временем начала колониального этапа истории в одних регионах и прелюдией к нему в других. Суверенное же национальное государство — та форма политической организации, которая сегодня позволяет стране быть полноценным субъектом международного права, так как в его основе лежит идея о государстве как базовой единице международных отношений, мировой политики. “Европа не принесла в Африку тропический вариант европейского национального государства конца XIX в. Вместо этого она создала мультикультурное и мультиэтничное государство” [4, р. 287].

Однако альтернативы провозглашению суверенных национальных государств у постколониальных стран попросту не было. При этом в постколониальных условиях порождённые колониализмом проблемы приобрели новые измерения, в том числе связанные с необходимостью замещения колониальных государств суверенными национальными государствами и, соответственно, с задачей максимально быстрого формирования национального — социокультурного, системноценностного — единства граждан, при котором в их иерархии идентичностей и самоидентификаций принадлежность к общности сограждан занимает более высокое место, чем членство в какой бы то ни было общности, охватывающей лишь их часть, в том числе в общности этнической, региональной, конфессиональной и т.д. Европе потребовались века на постепенную реализацию внутренних предпосылок для вызревания нации как формы культурного единства гражданского общества и национального государства как

формы его политической организации. В итоге в пределах национальных государств установилось (или, по крайней мере, утверждалось, что установилось) соответствие культурных и политических границ, а в результате сложения гражданского общества был преодолен разрыв между обществом и государством. В большинстве же постколониальных стран возникла необходимость сформировать гражданское общество, национальные государства и национальные культуры невиданно быстро на основе во многом случайных и разнородных конгломератов культур и социумов. И это при том, что изначальная, доколониальная внутренняя социокультурная динамика современных постколониальных обществ не вела их в направлении гражданского общества и нации европейского типа.

Таким образом, специфика постколониальных обществ и государств predetermined исторически — является следствием особого пути их формирования. Большинство из них начали складываться в колониальный период, а потому воспроизводили форму политических институтов и правовые нормы Запада Нового времени. Однако, копируя форму, постколониальное государство не могло автоматически усвоить присущего ей содержания, вложенного гражданским обществом, самостоятельно сложившимся в Европе, но не в Африке или Азии. Ввиду специфики пути формирования и развития большинства современных африканских и ряда азиатских государств в колониальный период наиважнейшей особенностью процесса образования наций в них стала изначальное ведущая роль не общества, а государства. Поскольку в афро-азиатских странах зрелые гражданские общества в колониальный период не сложились, их социумы оставались фрагментированными в племенном, этническом, религиозном, региональном и прочих отношениях, чем определялись идентичности большинства их членов. Это делало невозможным самоорганизацию обществ в нации сразу после получения колониями независимости, и только государства могли взять на себя интегрирующую роль. Таким образом, в постколониальных странах строительство наций было инициировано и направлялось внешней по отношению к обществу, вставшей над ним силой. Этим определяется своеобразие не только процесса, но и сегодняшних результатов формирования постколониальных наций, в частности, сохраняющийся существенный разрыв между обществом и государством, недостаточная сила влияния первого на второе. Суть проблемы постколониальных стран не в том, что государство в них стремится глубже проникнуть во все поры общества и его роль гораздо более определяющая, чем на Западе, а в том, что государство зачастую оказывается недостаточно эффективным с точки

зрения его собственной исторической и социокультурной логики.

Лишенные в большинстве случаев внутренних предпосылок для становления в нынешних границах и при этом имеющие новоевропейскую по происхождению политическую систему, постколониальные страны всё ещё могут оставаться жизнеспособными только при большой (в сравнении с либеральным Западом) роли государства. В том числе при сохранении его “конструктивистской” роли в строительстве наций. В частности, в ситуации постколониальности для конструирования национальной идентичности важна апелляция к историческому прошлому, и государство располагает широкими возможностями для манипулирования исторической памятью граждан во имя достижения национального единства.

В то же время роль исторического прошлого в постколониальном мире, и в том числе в связи с проблемой формирования наций, не только велика, но и двойка. Важно не только использование истории и манипулирование ею в различных целях разными акторами, в том числе (но не только) государством. Реальные исторические факты и процессы объективно способствуют или препятствуют образованию наций, могут воздействовать на направления их развития в наши дни. Многие проблемы постколониальных обществ, в особенности африканских, уходят корнями в доколониальную и колониальную историю. Также немало проблем возникло на протяжении уже примерно шести десятилетий их независимой истории. Все они усугубляются сохраняющимся периферийным положением Африки в глобальной мир-системе.

ВЛИЯНИЕ ИСТОРИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАЦИЙ В АФРИКАНСКИХ ГОСУДАРСТВАХ: ТРИ ПРИМЕРА

В этом разделе рассмотрим важнейшие историко-культурные аспекты процесса строительства наций в трёх постколониальных государствах Африки: Танзании, Замбии и Уганде, где между 2003 и 2018 гг. мы проводили полевые исследования этого вопроса. Географически эти страны образуют кластер или цепочку, поскольку Танзания граничит на севере с Угандой и с Замбией на юге, исторически их связывает тот факт, что в прошлом они были британскими владениями (континентальная часть Танзании до того принадлежала Германии).

В предыдущих работах нами показано, что сегодня Танзания ближе, чем большинство африканских стран, подошла к появлению нации в её классическом, то есть новоевропейском виде — как сообщества сограждан, разделяющих единую

систему ценностей, принадлежащих к одной национальной культуре, в чьём сознании общегражданская идентичность доминирует над частными и локальными идентичностями, а лояльность национальному государству важнее делений по региональному, религиозному, этническому или какому-либо другим признакам [5]. Для большинства других постколониальных обществ, в том числе замбийского и угандийского, частные, локальные идентичности гораздо значимее, чем для танзанийского.

По нашему мнению, основа этих существенных различий — историческая. Они связаны с особенностями их исторического прошлого — доколониального и колониального — и его интерпретациями в период независимости. В противоположность Замбии и Уганде, в Танзании социокультурная основа, сегодня единая для подавляющего большинства населения, начала формироваться задолго до установления колониального режима (сначала, с 1885 г., германского, а в 1919–1961/63 гг. — британского). Эта основа — культура суахили с её письменным языком, ныне — единственным официальным языком страны. Благодаря этому в Танзании рост национального самосознания может проявляться преимущественно (хотя, конечно, не исключительно) на уровне не отдельных народов, а почти всего её автохтонного населения.

То, что культура и язык относительно небольшого даже сегодня прибрежного народа суахили начали широко распространяться вглубь материковой части страны только в XIX в., — несомненный исторический факт. Более того, расширение ареала суахилийских культуры и языка происходило не без участия европейских миссионеров, часто проповедовавших на суахили и сделавших его языком преподавания в миссионерских школах. К тому же и культура, и язык суахили ещё в Средние века и раннее Новое время впитали множество арабских элементов.

Тем не менее сегодня огромная часть танзанийцев, независимо от происхождения и религиозной принадлежности, с гордостью причисляет себя к носителям суахилийской культуры, воспринимая её как автохтонную — однозначно африканскую, не связанную с колониальным наследием, — и объединяющую людей различных местных “племен” в танзанийскую нацию поверх (но не вместо) их локальных “племенных” идентичностей [6, 7]. В самом деле, африканцы, как правило, знают происхождение (не только “племенное” — этническое, но и региональное) своих друзей, соседей и коллег, но знать — не обязательно означает ставить во главу угла; как сказал один из респондентов, «мы (танзанийцы. — Д.Б.), в известном смысле, этнически слепы ...Если ты хочешь потерять уважение людей, повторяй каж-

дый раз: “Из какой ты этнической группы или региона?” В конце концов кто-нибудь решится спросить тебя: “Ну, а какая разница?”».

Для танзанийцев культура суахили, включая язык, — исток и основа танзанийской нации, таким образом, по их убеждению, не обязанной самим своим появлением европейцам и европейскому колониализму. Вот несколько из множества типичных высказываний на этот счёт танзанийцев разного возраста, уровня образования и социального положения: “Танзанийская нация существует, и она едина, потому что мы все говорим на одном и том же языке — суахили. В Танзании более 120 племён, но язык суахили объединяет нас всех”; “Да, есть танзанийская нация. Суахили — это не этничность. Неважно, является ли танзаниец по происхождению гого или лугуру, или кем-то ещё, мы объединены тем, что все говорим на языке суахили”; “Быть танзанийцем означает уметь говорить на суахили”; “Я уверен, что единая танзанийская нация существует, потому что у нас есть общий язык — суахили”; “Мы все говорим на суахили, мы все — братья и сёстры”. Многочисленные интервью с респондентами подтверждают правоту Н.В. Громовой, утверждающей, что в целом “этнолингвистическая ситуация в Танзании характеризуется заметным преобладанием языка суахили и его использованием во всех ключевых функциях коммуникативной сферы. Языки относительно крупных этносов, таких как сукума, ньямвези, хайя и некоторых других, сохраняющих компактность проживания, находятся не в столь угрожающем положении как языки мелких этносов, которые могут исчезнуть в недалёком будущем под влиянием мобильности и динамики современного языка суахили” [8, с. 92].

Культура суахили служит не только основой формирования, но и средством конструирования танзанийской нации с первых лет независимости. Официальная идеология, базирующаяся на “теории уджамаа”, разработанной первым президентом страны Дж.К. Ньерере, в немалой степени поспособствовала утверждению в сознании граждан представления о танзанийской нации не как о наследии колониализма (что, как отмечалось выше, в определённой степени так и есть, несмотря на то, что именно в колониальный период язык и культура суахили распространились и утвердились во всей Танганьике): «...нация, которая в теории уджамаа является носителем национальной культуры, передаваемой через язык суахили, в действительности есть государство. Таким образом, государственная идеология и национальная культура становятся синонимами; это неоправданная синонимия, которая позволяет путать “объективную” культуру суахили (историческую культуру прибрежных обществ) и “субъективную” политическую культуру суахили (т.е. [культуру] современной Танзании)» [9, р. 18; выделено

автором]. Государство и нация оказываются проявлениями единой сущности, как два лика Януса, как две стороны одной медали.

Напрямую связанная с государственной идеологией языковая политика, направленная на усиление позиций суахили как официального языка, также вносит существенный вклад во внедрение в сознание граждан страны убеждённости в давнем самостоятельном сложении танзанийской нации [10, 11]. “В то время как принятие национального языка было неизбежным аспектом создания общего национального интереса, принятие чёткой политической идеологии, как и установление сильного [политического] лидерства, стало важным инструментом, посредством которого можно было добиться легитимности [государства] и [сложения] нации” [12, р. 61]. Эта тенденция стала особенно сильной в последние годы, но Дж.К. Ньерере утверждал отношение к суахили как к единственному национальному языку Танзании с момента обретения страной независимости, и такой статус был законодательно закреплён за этим языком в 1967 г. Действительно, “когда речь идёт о преднамеренных попытках продвижения как в формальных, так и в неформальных сферах жизни и о создании подлинно национального и официального языка, распространение суахили среди населения Танзании после получения независимости постоянно упоминается как пример замечательно успешно спланированного внедрения африканского национального языка в полиэтнической среде. Ныне, в результате огромных усилий, прилагавшихся с 1960-х годов, суахили распространён в Танзании чрезвычайно широко и используется в сферах образования, государственного управления и межэтнического общения по всей стране” [13, р. 10].

Тогда как существование с доколониальных времён автохтонных языка и культуры суахили, в раннеколониальный период распространившихся по всей стране, делает Танзанию счастливым исключением из правила, Замбия и Уганда, подобно большинству постколониальных государств, особенно африканских, не имеют такой основы национального единства. Ни одна из местных культур не в состоянии играть эту роль; интеграция народов современных Замбии и Уганды началась только в колониальный период и благодаря колониализму. Таким образом, исторической и культурной основой формирования замбийской и угандийской наций не может служить ничто иное, кроме колониального социокультурного наследия, включая язык бывшей метрополии — английский. Некоторые респонденты в этих странах отмечали, что проживающие в каждой из них народы “имеют сходства в культурах и традициях”, “говорят на схожих языках”, но, конечно, никто из них не мог утверждать, что они принадлежат к одной автохтонной культуре в

том смысле, в каком танзанийцы различного этнического происхождения причисляют себя к носителям культуры суахили. В то время как огромная часть танзанийских респондентов утверждала, что единая танзанийская нация существует, большинство собеседников в Замбии и Уганде представляли свои страны как конгломераты “племён” (этнических групп) со своими языками и культурами. В этих странах государствам приходится пытаться интегрировать население в нации, стараясь усилить довольно слабое культурное единство, которое начало появляться только в границах колоний и на основе языка бывшей колониальной державы (хотя, в частности, в Замбии государство с 1990-х годов предпринимает попытки представить многоязычие и, следовательно, поликультурность не как препятствие, но, напротив, как фактор, способствующий строительству нации). Как пишет Э. Ньянг, «постколониальные государства построены на морально и этически неопределённых основаниях ...Никогда не было... ясно, чем постколониальное государство должно было быть или какие добродетели и мораль оно должно было создавать или культивировать в африканских народах ...постколониальное государство не предложило никакого морального разрешения дилеммы “общины”, социальной солидарности и легитимной власти» [14, р. 201, 202].

Примечательно, что в Танзании единство автохтонной культуры суахили для подавляющего большинства граждан африканского происхождения своей оборотной стороной имеет склонность некоторой части из них не считать членами своей нации сограждан, представляющих этно-расовые меньшинства, образовавшиеся в доколониальную и колониальную эпохи, главным образом арабов и выходцев из Южной Азии, обобщённо именуемых “индийцами” [5, с. 227–229, 15]. В Замбии отсутствие подобной интегрирующей местной культуры и вынужденная опора на колониальное наследие привели к лучшему отношению к подобным сообществам, крупнейшее из которых — индийское [16]. В Уганде диктатор И. Амин в 1972 г. изгнал из страны южноазиатское по происхождению меньшинство. В конце XX — начале XXI вв. лишь небольшая часть “азиатов” и их потомков вернулась в Уганду. Сегодня они слабо проявляют себя в экономической и общественной жизни страны, и у большинства её населения вызывают эмоции в основном в историческом контексте — в связи с памятью о событиях 1972 г. Очевидно, что те события были вызваны нежеланием И. Амина в сплочении граждан опереться на колониальное наследие, как в Замбии, при отсутствии интегрирующей доколониальной автохтонной культуры, как в Танзании, и невозможностью сделать ставку на поддержку одного из крупных этносов страны, поскольку

сам он был смешанного этнического происхождения, и по отцу, и по матери принадлежал к немногочисленным народам — каква и лугбара. В такой ситуации ему ничего не оставалось, кроме как пытаться объединить угандийцев вокруг собственной персоны, в том числе на основе ненависти к носителям иной, достаточно закрытой культуры, резко выделявшимся экономическим благополучием.

Более того, с точки зрения перспектив построения наций Замбия и Уганда имеют как минимум ещё один сдерживающий фактор по сравнению с Танзанией. В доколониальные времена на территории Танганьики (континентальной части Танзании) не сложились централизованные экспансионистские политические образования, за исключением королевства Шамбаа (Шамбала) одноимённого народа. Если бы их возникло несколько, в постколониальном государстве они могли бы стать центрами трибалистского этнического регионализма или сепаратизма и пробуждать у соседних народов историческую память об их угнетении предками нынешних сограждан. В Танзании же потенциальное сопротивление относительно слабых вождей было эффективно и без больших сложностей пресечено на заре независимости страны [12, р. 61]. Пусть их неформальное влияние и сохранилось [17], они не могут представлять собой силы, противостоящей строительству нации. Некоторые наши респонденты указывали на отсутствие трибализма как на признак существования танзанийской нации наряду с языком и культурой суахили.

В то же время на территории Замбии в доколониальный период возвысились как минимум четыре мощные политии: народов бемба, лози (баротсе), лунда и чева. После провозглашения независимости, в частности, лидеры бемба и баротсе попытались обеспечить политическое доминирование в стране своих народов, и первому президенту Замбии К.Д.Б. Каунде потребовалось много усилий, включая и осуществление репрессивных мер, и раздачу высоких государственных должностей, чтобы взять над ними верх. Однако с переходом к многопартийности в 1990-е годы этнический фактор вновь громко заявил о себе: несколько политических партий было создано на этнической основе [18, с. 51–61]. Особую остроту приобрела борьба между политическими организациями бемба и лози, подогревавшаяся чувством особой исторической значимости каждого из этих этносов в сердцах активистов. Другая проекция на постколониальную современность доколониального прошлого в Замбии — не теряющий болезненности с первых лет независимости вопрос о предоставлении автономии Баротселенду — бывшему королевству лози. Показателен ответ студентки на вопрос “Что необходимо сделать в сфере отношений между народами Вашей стра-

ны?": “Улучшить их путём избавления от комплекса неполноценности, который отдельные люди из некоторых народов испытывают по отношению к другим народам, например, к бемба и лози”.

В Уганде накануне провозглашения в 1894 г. британского протектората на региональной политической сцене доминировали четыре королевства: Буганда народа ганда было самым могущественным, за ним следовали Буньоро ньоро, Нкоре, или Анколе, народа ньянколе и Торо одноимённого этноса. Несмотря на искренние утверждения многих респондентов в этой стране о том, что они горды быть угандийцами и что угандийская идентичность очень важна для них, почти все они акцентировали и свою этническую принадлежность. Особенно характерно это для ганда, многие из которых называли свой народ “центральным народом” Уганды в географическом и политическом отношении, но также в историческом и культурном, утверждая, что ганда некогда “цивилизировали” другие племена современной Уганды, “дали им свою культуру и цивилизацию”. Вот типичное высказывание: “Сегодня ганда принимают другие племена: они позволяют другим племенам приходить в своё королевство, делятся с ними своей культурой. Ганда интегрируют угандийцев. Буганда как королевство объединяет Уганду. Так что сегодня нация едина потому, что она объединяется Королевством Буганда”. Наши интервью ясно показывают, что эта концепция гандийского этнонационализма, даже исключительности ганда основывается на постулате о политическом и культурном доминировании в регионе Королевства Буганда накануне колониализма и на желании восстановить его исключительное положение в рамках Республики Уганда в будущем.

Если танзанийское законодательство не признаёт власть вождей с 1962 г., то есть ещё со времён до объединения Танганьики и Занзибара в Объединённую Республику Танзания, то Конституция Замбии 1996 г. провозгласила воссоздание некогда упразднённой К.Д.Б. Каундой Палаты вождей при национальном парламенте. Как прямо заявил в беседе с нами один из её членов, Палата старается оказывать влияние на все сферы общественной и политической жизни страны и на региональном, и на общегосударственном уровне, несмотря на то, что официально её прерогативы ограничиваются так называемыми “традиционными вопросами”. Деревенские и окружные вожди также весьма влиятельные фигуры на своих уровнях компетенции (например, как удалось выяснить в ходе полевого исследования, их невозможно обойти добывающим компаниям, даже крупным зарубежным, желающим разрабатывать недра на подвластных им землях).

В Уганде президент А.М. Оботе объявил традиционных правителей вне закона на следующий год после свержения им в 1966 г. первого президента страны и одновременно *кабаки* (короля) Буганды Эдуарда Мутесы (Мутесы II). Отказался восстановить их власть и сменивший А.М. Оботе И. Амин. Однако находящийся на посту президента по сей день Й.К. Мусевени официально признал их снова вскоре после прихода к власти в 1986 г. В Уганде сосуществует множество местных титулованных особ различного ранга. Как сказал один респондент, “многие из них настолько бедны и незначительны, что у них даже нет собственных автомобилей”, но некоторые — очень влиятельные персоны. Особенно это утверждение верно по отношению к *кабаке* Буганды. М. Карлстрём показал, что чувство “коллективного будущего” ганда — современное (*modern*), но отчётливо гандийское, поскольку оно укоренено в вере в нерушимость власти *кабаки* и нерасторжимость мистической связи между ним и его народом [19, 20].

Результаты наших полевых исследований дают все основания утверждать, что эти идеи только укрепились в головах большинства ганда со времени работы среди них М. Карлстрёма. Практически все наши респонденты-ганда признавали себя подданными *кабаки* и при этом многие открыто заявляли, что для них он важнее, чем президент Уганды. Как сказал один из них, “поскольку вы — не ганда, вы не можете понять нас. Но у нас *кабака* — в крови и костях, тогда как президент — это кто-то, чья должность была придумана для нас британцами”. *Кабака* — живой символ и вместилище идентичности и культуры ганда, их былого могущества, сегодняшней славы и будущего величия. Неимоверная честь для ганда — получить сертификат подданного *кабаки*, подписанный самим правителем: взятый в рамку, он займёт самое видное место в жилище своего обладателя. Почитание *кабаки* происходит, например, в форме добровольного совершения подношений его духу в священной роще Ссезибва. С 1966 по 1986 г. монаршая семья Буганды проживала в изгнании. В 1986 г. она вернулась на родину, а в 1993 г. традиционная монархия ганда была восстановлена. Положение *кабаки* в сегодняшней Уганде не обусловлено просто “уважением к традициям”: он один из богатейших и политически влиятельнейших людей страны; возможно, второй после президента Республики. Помимо пышного двора *кабаки*, занимающего дворец в столице Уганды Кампале, важность Буганды в рамках Республики Уганда проявляется в существовании у неё собственных кабинета министров и парламента, также располагающегося в Кампале. По размерам и тщательности охраны дворец *кабаки* и здание парламента Буганды вполне сопоставимы с президентским дворцом и зданием национального парламента.

Другие традиционные правители Уганды не столь влиятельны, как *кабака* Буганды, но королевства Буньоро, Торо, Бусога (народа сога) и Рвензуру (народов конджо и амба) тоже имеют собственные политические институты, параллельные органам угандийского государства. Следует отметить, что Бусога превратилась в королевство только в колониальный период, а Рвензуру — даже в ранний постколониальный. Подданные правителей всех этих королевств (как и множества более мелких правителей по всей стране) не менее преданны им, чем ганда *кабаке*. Для них их короли и вожди — тоже вместилища этнической и культурной идентичности их народов. “Чтобы обозначить свою идентичность, я должен принадлежать к определённому королевству. Поэтому вы можете увидеть, что многие люди здесь (в Уганде. — Д.Б.) уважают королевства. И вы даже можете сказать, что они уважают их больше, чем угандийское правительство”, — объяснил один из образованных собеседников. Как сказал, например, старик крестьянин, “поскольку я сога, я должен признавать короля сога: его власть обязательна, и с этим ничего нельзя поделать”. С этой точки зрения естественно, что для многих граждан, по мнению другого респондента-сога, несмотря на их приверженность Уганде как нации, “король важнее президента”. “Важно быть и угандийцем, и подданным короля, но я думаю, что быть подданным моего королевства — более важно в моей жизни”, — сказала женщина-ганда, и она была далеко не единственным респондентом, утверждавшим это. Также неудивительно, когда собеседники нередко говорили, что в стране “до сих пор существует некоторая разобщённость по племенам” (хотя другие угандийцы подчёркивали вклад в недостаточную крепость национального единства социально-экономической стратифицированности общества или существующих в нём политических противоречий). По словам респондента, “моя идентичность сога — естественная, а искусственная — угандийская, потому что в наши дни ты должен иметь паспорт Уганды. Но здесь (в Уганде. — Д.Б.) я мусога, он муганда (ед. ч. от “сога”, или “басога”, и “ганда”, или “баганда” соответственно. — Д.Б.). Вот как мы идентифицируем себя”.

Ещё один важный культурный фактор, влияющий на сложение наций, — религиозная ситуация в том или ином государстве, особенности которой также коренятся в его прошлом, в Африке — доколониальном и колониальном. Эта ситуация различна в трёх рассматриваемых нами странах, притом что во всех них так называемые “традиционные”, то есть автохтонные, религии отнесены на задний план религиями мировыми — христианством и исламом, сохраняясь в чистом виде в некоторых глубинных районах и более широко — в форме двоеверия. При этом и христианство, и

ислам представлены огромным множеством мелких и крупных ответвлений.

В Танзании ислам утвердился (особенно прочно — на островах и побережье Индийского океана) задолго до европейского колониализма, который принёс с собой широкое распространение христианства, прежде всего в форме католицизма, лютеранства и англиканства. Оценки современной численности христиан и мусульман в Танзании разнятся (а официальная фиксация религиозной принадлежности, например, при переписи населения, запрещена), но можно утверждать, что христиане и мусульмане составляют, соответственно, примерно 60 и 35% населения страны [21, 22]. В государственных институтах заметно преобладание христиан, что мусульманами иногда воспринимается как проявление дискриминации, а христианами — как логичное следствие их в среднем более высокого образовательного уровня (что тоже — прямое наследие колониализма: в тот период путь вверх по социальной лестнице пролегал через получение европейского образования, а оно было тесно связано с церквями, активно создававшими приходские школы). Несмотря на некоторое нарастание напряжённости, взаимоотношения мусульман и христиан в Танзании в целом остаются мирными. Среди причин этого большую роль играют как политика государства, с момента получения страной независимости утверждающего себя как светское, официально не отдающее предпочтения какому-либо религиозному сообществу, так и социокультурные особенности танзанийского общества. Таких особенностей можно выделить три. Первая: среди танзанийцев всех религий, а также социальных слоёв и этнических групп по сей день первостепенную роль играют родственные связи, и это притом, что у многих людей среди родственников есть и христиане, и мусульмане. Вторая (отчасти как следствие первой): в континентальной части Танзании не сложилось “мусульманских” и “христианских” народов: хотя в целом христиан больше на севере страны, а мусульман — на юге, практически в каждом этносе заметно наличие и тех, и других. Наконец, третья социокультурная особенность, способствующая интеграции и мусульман, и христиан в танзанийскую нацию, — опять же общность для подавляющего большинства граждан культуры суахили, на основе которой эта нация и формируется. Ещё в доколониальные времена глубоко усвоившая ислам, культура суахили благодаря тому, что миссионеры часто проповедовали и вели занятия в приходских школах на языке суахили, ощущается как своя и христианами.

В Уганде ислам также появился раньше христианства (хотя и намного позже, чем в Танзании). Однако на сегодняшний день христиане различных деноминаций (в основном католики,

англикане и пятидесятники), с одной стороны, существенно превосходят в численности мусульман, составляя 84.5% населения, а с другой стороны — мусульмане образуют его очень заметное меньшинство (13.7% согласно переписи 2014 г.) [23, р. 19]. Особенно много мусульман в центральных и восточных районах страны, где исторически ислам распространился раньше, чем в других частях Уганды, и раньше, чем христианство. Наше полевое исследование выявило элементы настороженности во взаимоотношениях угандийских христиан и мусульман, но, как и в Танзании, на данный момент они в целом остаются мирными и даже улучшаются, по оценкам некоторых респондентов. Политика же угандийского государства в области религии отличается от политики государства танзанийского. Если последнее, как упоминалось, со времён Дж.К. Ньерере официально отказывается отдавать предпочтение каким-либо деноминациям, то в Уганде в 1977 г. диктатор И. Амин запретил 27 религиозных организаций, а при нынешнем главе государства, Й.К. Мусевени, был создан Межрелигиозный совет Уганды, в который включены далеко не все деноминации, представленные в стране, притом что членство в нём даёт религиозной организации статус официально признанной и поддерживаемой государством. Когда в 2016 г. правительство заявило о намерении впредь регулировать религиозную жизнь общества и деятельность религиозных организаций, члены Межрелигиозного совета неслучайно единодушно поддержали эту инициативу, а лидеры не представленных в Совете деноминаций столь же единодушно её осудили [24, 25]. Такая политика отражает меньшую интегрированность граждан Уганды в нацию по сравнению с танзанийцами и усиливает их разделение по религиозному признаку.

В Замбии, в отличие от Танзании и Уганды, абсолютно доминируют христиане, составляющие 95.5% населения [26, р. 19, 20]. Такое положение подтолкнуло государство в лице президента страны в 1991–2002 гг. Ф.Дж.Т. Чилубы к провозглашению Замбии “христианской нацией”, то есть к попытке сформировать национальное единство на религиозной основе. В 1996 г. положение о Замбии как “христианской нации” было включено в новую, действующую до сих пор Конституцию страны. При этом опора Чилубы на набирающих силу харизматических евангелистов-пятидесятников вызвала недовольство приверженцев давно ставших традиционными для Замбии христианских конфессий — англикан, пресвитериан, католиков и др. Оказалось, что в различных христианских деноминациях Замбии “христианскую нацию” видят по-разному, и между их лидерами развернулась напряжённая политическая борьба [27]. Характерно, что, по сведениям наших угандийских респондентов, в

их стране власти также в реальности оказывают покровительство и создают привилегированные условия для деятельности, в том числе общественной, “новых церквей” харизматических евангелистов.

Таким образом, многообразие религиозных идентичностей граждан, во всяком случае на данном этапе, не особенно препятствует сложению единой национальной идентичности в Танзании, едва ли способствует её формированию в Уганде, а в Замбии попытка государства построить “христианскую нацию” до сих пор не привела к успеху.

Итак, наш главный тезис заключается в том, что разница в процессе нациестроительства и его текущих итогах в Танзании, с одной стороны, и в Замбии, Уганде — с другой, могут быть объяснены существенными различиями в их реальной доколониальной и колониальной истории, а также в том, как происходит опора на историю и совершается манипулирование ею в эпоху независимости. Если в Танзании национальное единство имеет основу в доколониальной культурной истории автохтонных народов, и мысль об этом настойчиво внедряется в сознание граждан официальной идеологией, то в Замбии и Уганде основа единства была создана (разумеется, непроизвольно) только колониальными режимами. Многие замбийские и угандийские собеседники прямо говорили, что их нации сформировались (или начали формироваться) в колониальные времена, а получение независимости стало кульминационным моментом в этом процессе. Вот типичное высказывание: замбийская нация “сформировалась после того, как в 1911 г. Северо-Западная и Северо-Восточная Родезия были объединены и образовали Северную Родезию, которая была провозглашена независимой Замбией в 1964 г. С тех пор замбийская нация сохраняется, даже несмотря на то, что у нас [в стране] — 72 народа” (72 — официальное число “племён”, образующих автохтонное население Замбии). Угандийские собеседники также утверждали, что “история Уганды начинается с прихода британцев” или даже “со дня независимости в 1962 г.”. В полную противоположность танзанийским информантам, в Замбии и Уганде никто не относил формирование наций к доколониальному периоду; напротив, несколько человек в обоих государствах утверждали, что даже в наши дни замбийской и угандийской наций не существует, а есть лишь конгломераты “племенных” культур.

По нашему убеждению, выявленные различия обусловлены в первую очередь существованием с доколониальных времён основы для национальной интеграции в Танзании в виде наличия культуры и языка суахили и почти полного отсутствия сильных централизованных политий, с одной

стороны, и отсутствием таких благоприятных предпосылок вплоть до периода колониализма в Замбии и Уганде — с другой. И без того чрезвычайно важные, эти факты становятся ещё более значимыми благодаря апелляции к ним и манипулированию исторической памятью о них со стороны государства. Во всех трёх странах государства обращаются к исторической памяти народов в попытках консолидировать нации, но также в целях достижения более прочной собственной легитимности в умах и душах граждан — эти задачи неразрывны. Легитимация — убеждение управляемых в том, что именно данное правительство хорошо для них (обретение легитимности) — жизненно важная постоянная задача любой власти, и манипуляции с историей служат легитимизационными практиками по самой своей сути: государство предпринимает попытки построить нацию, члены которой ощущали бы свою неотделимость от государства в его нынешней форме.

ПЕРСПЕКТИВЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАЦИЙ В ПОСТКОЛОНИАЛЬНЫХ ГОСУДАРСТВАХ АФРИКИ

Если мы посмотрим на мир постколониальных государств в целом в заданном выше теоретическом контексте, то снова будем должны отметить, что в большинстве из них, в особенности африканских, нет интегрирующих автохтонных культур и языков, подобно суахили в Танзании. Вследствие лучших исторических предпосылок Танзания сегодня ближе, чем, в частности, Замбия или Уганда, к формированию нации, адекватной западной версии модерна. Ещё раз подчеркнём, что танзанийская ситуация — скорее исключение из правила, тогда как Замбия и Уганда — случаи типичные. Теории, основывающиеся на европейском историческом опыте, подсказывают, что Танзания имеет лучшие перспективы нациестроительства. Однако не станем исключать, что в долгосрочной перспективе в условиях подъёма мультикультурализма и существенного сдвига в восприятии нации как социальной реальности в современном мире положение Замбии и Уганды может оказаться не менее выигрышным для мультикультурного нациестроительства и создания эффективных постколониальных национальных государств, чем Танзании, несмотря на все очевидные сдерживающие факторы, включая этнонационализм.

Чтобы прояснить суть нашего тезиса, проведём аналогию между социокультурной и экономической историей постколониальных государств. В первые десятилетия независимости многие из них стремились воплотить в жизнь так называемую “модель догоняющего развития”, то есть ставили задачу индустриализации страны,

создания экономической системы, подобной существовавшей в развитых странах. Эта модель не оправдала себя: пока постколониальные страны пытались индустриализироваться, Первый мир уже переходил в постиндустриальное состояние, и разрыв между ним и Третьим миром только увеличивался. В постколониальных государствах также ставилась и продолжает ставиться задача строительства наций по образцу европейских наций Нового времени, несмотря на колоссальные трудности такого строительства, связанные в том числе с отличиями от европейских политических культур, социальных институтов, систем ценностей и т.д.

В связи с этим не является ли в современной глобальной ситуации положение Замбии, Уганды и большинства постколониальных стран, подобных им, не менее перспективным, чем Танзании? Тем более что в таких странах, как Замбия и Уганда, основной водораздел пролегает между культурами составляющих абсолютное большинство населения автохтонных народов, различия между которыми не столь разительны, как между культурами коренного населения и многих общин мигрантов — двух основных “культурных акторов” в современных странах Запада. Сегодня поставленный нами вопрос не имеет достоверного ответа, в том числе ввиду неясности перспектив мультикультурализма на Западе, который, несмотря на множество внутренних проблем и подъём некоторых незападных государств, всё ещё играет ведущую роль в глобальных социокультурных процессах. Тем не менее, возможно, настало время этот вопрос хотя бы поставить.

Уникальная история постколониальных обществ сделала их путь к модерну и существование в мире модерна чрезвычайно своеобразным, сильно отличающимся от европейского. Однако идеальная модель нации ныне радикально трансформируется на самом Западе, тогда как первоосновы большинства постколониальных обществ могут сделать процесс формирования наций в них в глобальном масштабе не догоняющим, а опережающим. То, что нации образуются в постколониальных государствах (в разных странах — разными темпами и со своими особенностями), может считаться дополнительным подтверждением факта множественности модернов, поскольку сложение наций — фундаментальная черта модерна как такового, любой из множества его форм. Глобализация как процесс расширения географических ареалов, умножения сфер и углубления результатов межкультурного взаимодействия имманентно присуща всемирной истории [28, 29]. Однако только в раннее Новое время “европейцы первыми сделали единство мира осознанным, общение планомерным, длительным и надёжным” [30, с. 169] — глобализация стала необратимой. Поэтому в наши дни для многих

глобализация неверно, но прочно ассоциируется только с эпохой модерна (Новым временем), начавшейся на Западе полтысячелетия назад и породившей, в числе прочего, феномены колониализма и постколониализма. Нацестроительство же в современных постколониальных странах показывает, что глобализация ни в коей мере не совпадает с вестернизацией, а модерн (современное общество Нового времени, ныне трансформирующееся в общество постмодерна) как исторически-специфический тип социума и культуры представляет собой совокупность его вариантов — множественность модернов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-18-00454, <https://rscf.ru/project/18-18-00454/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Eisenstadt S.N.* Multiple Modernities // *Daedalus*. 2000. V. 129(1). P. 1–29.
2. *Comaroff J., Comaroff J.L.* Introduction // *Modernity and Its Malcontents: Ritual and Power in Post-colonial Africa* / Eds. J. Comaroff, J.L. Comaroff. Chicago: University of Chicago Press, 1993. P. XI–XXXI.
3. *Schmidt V.H.* Multiple Modernities or Varieties of Modernity? // *Current Sociology*. 2006. V. 54(1). P. 77–97.
4. *Mamdani M.* *Citizen and Subject: Contemporary Africa and the Legacy of Late Colonialism*. Princeton; Oxford: Princeton University Press, 2018.
5. *Бондаренко Д.М.* Постколониальный мир: формирование наций и историческое прошлое // *Культурная сложность современных наций* / Под ред. В.А. Тишкова, Е.И. Филипповой. М.: Политическая энциклопедия, 2016. С. 224–240.
6. *Бондаренко Д.М.* Образование и толерантность в Танзании (по материалам Российской антропологической экспедиции 2003 и 2005 гг.) // *Джулиус Камбараре Ньерере — первый президент свободной Танзании* / Под ред. Ю.Н. Винокурова. М.: Институт Африки РАН, 2010. С. 56–62.
7. *Иванченко О.В.* Танзания: национальное и этническое самосознание // *Азия и Африка сегодня*. 2013. № 6. С. 53–59.
8. *Громова Н.В.* Язык суахили в современной Танзании: значение, роль, перспективы // *Межрасовые и межэтнические отношения в современной Танзании. Труды российской комплексной экспедиции в Объединённой Республике Танзания (сезон 2005 г.)* / Под ред. А.В. Коротаева, Е.Б. Деминцевой. М.: Ленанд, 2008. С. 84–93.
9. *Blommaert J.* Ujamaa and Creation of the New Waswahili // *Living through Languages: An African Tribute to René Dirven* / Ed. C. van der Walt. Stellenbosch: Sun, 2006. P. 5–22.
10. *Blommaert J.* *State Ideology and Language in Tanzania*. Edinburgh: Edinburgh University Press, 2014.

11. *Kioko A.N.* Development of National Language Policies in East Africa: The Interplay of Opportunity, Equity and Identity // *Language Rich Africa Policy Dialogue: The Cape Town Language and Development Conference: Looking beyond 2015* / Ed. H. McIlwraith. L.: British Council, 2014. P. 21–29.
12. *Kavina A.* Positive and Negative Aspects of Globalization in Nation Building in Africa // *Учёные записки Института Африки РАН / Journal of the Institute for African Studies*. 2020. № 1. P. 59–70.
13. *Simpson A.* Introduction // *Language and National Identity in Africa* / Ed. A. Simpson. Oxford: Oxford University Press, 2008. P. 1–25.
14. *Niang A.* The Post-colonial African State in Transition: Stateness and Modes of Sovereignty. N.Y.; L.: Rowman & Littlefield, 2018.
15. *Банищикова А.А., Иванченко О.В.* Воспоминания об арабской работорговле и межэтнические отношения в современной Танзании: между семейной травмой и государственной политикой толерантности // *Антропологический форум*. 2020. № 44. С. 83–113.
16. *Bondarenko D.M.* Historical Memory and Intercultural Tolerance: Students' Attitudes to the Colonialism-Born Minorities in Tanzania and Zambia // *Social Evolution and History*. 2014. V. 13(2). P. 97–118.
17. *Nkyabonaki J.* The Influence of Indigenous Administration on Post-Independence Administration in Tanzania // *The Omnipresent Past. Historical Anthropology of Africa and African Diaspora* / Eds. D.M. Bondarenko, M.L. Butovskaya. Moscow: LRC Publishing House, 2019. P. 183–195.
18. *Прокопенко Л.Я.* Замбия: особенности становления многопартийной системы (90-е годы). М.: Институт Африки РАН, 2000.
19. *Karlström M.* The Cultural Kingdom in Uganda: Popular Royalism and the Restoration of the Buganda Kingship. Ph.D. diss. Chicago: University of Chicago, 1999.
20. *Karlström M.* Modernity and Its Aspirants: Moral Community and Developmental Eutopianism in Buganda // *Current Anthropology*. 2004. V. 45(5). P. 595–619.
21. *Brown D., James P.* Religious Characteristics of States Dataset Project – Demographics v. 2.0 (RCS-Dem 2.0), Countries Only. 10 Feb. 2019. <https://www.thearda.com/Archive/Files/Descriptions/RCSDEM2.asp> (дата обращения 10.03.2021).
22. *World Population Review 2021*. <https://worldpopulationreview.com/countries/tanzania-population> (дата обращения 10.03.2021).
23. *The National Population and Housing Census 2014 – Main Report*. Kampala: Uganda Bureau of Statistics, 2016. https://www.ubos.org/wp-content/uploads/publications/03_20182014_National_Census_Main_Report.pdf (дата обращения 10.03.2021).
24. *Alava H., Ssentongo J.S.* Religious (De)politicization in Uganda's 2016 Elections // *Journal of Eastern African Studies*. 2016. V. 10(4). P. 677–692.
25. *Isiko A.P.* State Regulation of Religion in Uganda: Fears and Dilemmas of Born-Again Churches // *Journal of African Studies and Development*. 2019. V. 11(6). P. 99–117.
26. *Zambia 2010 Census of Population and Housing – National Analytical Report*. Lusaka: Central Statistical Office, 2012. <https://unstats.un.org/unsd/demographic/sources/census/wphc/Zambia/PreliminaryReport.pdf> (дата обращения 22.03.2021).
27. *Phiri I.* President Fredrick J.T. Chiluba of Zambia, The Christian Nation and Democracy // *Journal of Religion in Africa*. 2003. V. 33(4). P. 401–428.
28. *Бондаренко Д.М.* Глобализация или диалог цивилизаций: современные теоретические подходы и будущее незападных культур // *Разнообразие культур: опыт России и Левантийского Востока* / Под ред. С. Фараха, О. Савиновой. Бейрут: Ливано-Российский Дом; Национальный Комитет ЮНЕСКО в Ливане, 2005. С. 181–187.
29. *Comparing Globalizations: Historical and World-Systems Approaches* / Ed. T.D. Hall. Cham: Springer, 2017.
30. *Ясперс К.* Истоки истории и её цель. Вып. 2. М.: ИНИОН АН СССР, 1991.

Д. О. Иванов, А. И. Мелуа, А. Д. Ноздрачев. Академики Победы
Под общей редакцией А.И. Мелуа. СПб.: Гуманистика, 2020. 971 с.

© 2022 г. А. В. Полевщиков

Институт экспериментальной медицины, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: polevshikov.av@iems.spb.ru

Поступила в редакцию 23.06.2021 г.

После доработки 26.06.2021 г.

Принята к публикации 22.08.2021 г.

Ключевые слова: академики Победы, Академия наук СССР, Великая Отечественная война 1941–1945, биографии, энциклопедия.

DOI: 10.31857/S0869587322010078

В начале мая 2021 г. вышла в свет энциклопедия “Академики Победы”, подготовленная коллективом авторов в составе доктора медицинских наук Д.О. Иванова, доктора философских наук, кандидата технических наук А.И. Мелуа и академика РАН А.Д. Ноздрачева. Эта работа продолжает публикацию превосходных биографических энциклопедий издательства “Гуманистика”, посвящённых членам Российской академии наук, однако новая книга, приуроченная к 75-летию Победы Советского Союза в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг., занимает среди них особое место.

Академия наук СССР по праву присутствует в ряду героических трудовых коллективов, приближавших Победу [2–5]. История учит нас не использовать сослагательного наклонения, но большой вопрос, как развивались бы события тех грозных лет, если бы в СССР к началу войны не было научных кадров высочайшей квалификации и научных школ. Новые архивные материалы и введённые в научный оборот воспоминания позволяют авторам энциклопедии расширить наши знания о том тяжёлом времени. “Академики Победы” — это, в первую очередь, дань памяти людям и коллективам, которые вели свою войну на передовой научного фронта. Именно их открытия и технологии приближали саму возможность разгрома врага. За упоминаемыми в книге персоналиями прослеживаются не только конкретные судьбы, но и научные коммуникации, школы и сообщества. Именно научную среду считали

принципиально важным уничтожить поработители Европы из гитлеровской Германии, вполне резонно видевшие в учёных серьёзную интеллектуальную угрозу реализации своих планов установления тотального мирового господства.

Доступное высшее образование, непрерывная подготовка научных кадров были одними из важнейших приоритетов советской власти. Используя традиции и потенциал академического сообщества Российской империи и создав массовое движение в пользу научного познания мира, советское государство сформировало одно из мощнейших академических сообществ — Академию наук, состоявшую из 123 научных учреждений (47 институтов, а также лабораторий, обсерваторий, станций и других научных структур) [6]. Научно-образовательная база Москвы, Ленинграда, других крупных научных центров становилась генератором обеспечения промышленности, в том числе военной, кадрами, разработками, технологиями и инновациями. Если мы присмотримся к биографиям 393 членов Академии наук, которые приведены в энциклопедии, то увидим, что социальные лифты позволяли пробиться в науку талантам из самых дальних городов, посёлков, сёл и деревень, выходцам из различных социальных слоёв. Научные лаборатории, архивы, библиотеки и научно-исследовательские институты составляли важную часть довоенного образовательного и социального ландшафта страны, и именно в них проходило становление будущих академиков.

Играя роль ядра сетцентрической научной структуры СССР, Академия наук во многом служила символом успехов советской власти в области открытий и передовых разработок, в том чис-

ПОЛЕВЩИКОВ Александр Витальевич — доктор биологических наук, заведующий отделом иммунологии Института экспериментальной медицины.

ле направленных на продвижение политического устройства и идей на то время единственной в мире социалистической страны. Первые пятилетки показали высокие возможности подготовки кадров и разработки технологий для нужд военно-промышленного комплекса. Отметим, что многие из талантливых представителей естественно-научных, инженерных, педагогических специальностей начинали свой путь в академическое сообщество в рамках повышения уровня образования или, получив направление на научную работу. Приведённые в книге сведения первой половины 1940-х годов позволяют уверенно говорить о большой роли Академии наук СССР в военный период, а также утверждать, что созданная в довоенное время академическая научная структура оказалась эффективной для обеспечения потребностей фронта и тыла.

Сразу после начала войны президиумом Академии наук СССР было принято решение о немедленном формировании для нужд обороны специальных академических комиссий разных научных направлений. Эти комиссии мобилизовывали интеллектуальные ресурсы академии с учётом их максимального соответствия практикоориентированным задачам военного времени. Они касались непосредственных нужд армии и флота, их снабжения и логистики. Были созданы отраслевые комиссии, в том числе географическая, морская, ресурсов полезных ископаемых, по разведке и использованию территориальных ресурсов Западной Сибири, Урала, Казахстана, Поволжья, Средней Азии. Комиссии тесно взаимодействовали с местными властями, промышленными предприятиями, наркоматами, объединяя усилия всех уровней на решение оборонных задач. На примере участников памятной летописи можно проследить, каким образом создавались новые предприятия и целые промышленные районы, велась оптимизация управления отдельными территориями с целью повышения их эффективности.

Инициативы Академии наук способствовали скорейшему формированию комплекса научных и управленческих знаний для быстрого и результативного решения насущных задач армии, обороны. В биографических статьях энциклопедии отражены не только личные достижения членов академии — практически каждая из них представляет читателю ключевые аспекты взаимосвязи между ситуацией на фронте и задачами научного сообщества. В числе этих аспектов невиданная по масштабам эвакуация предприятий и развёртывание промышленности на Урале, угроза захвата противником нефтяных промыслов и геологоразведочные экспедиции в Башкирию с целью поиска новых нефтяных месторождений, проблемы снабжения фронта продовольствием и работа над

повышением эффективности сельского хозяйства.

На втором этапе войны, когда началось освобождение территории страны от захватчиков, лента упоминаемых авторами энциклопедии событий демонстрирует, как происходило возвращение исследователей, а с ними и учреждений, лабораторий из эвакуации. Одновременно с этим процессом в Сибири и республиках Средней Азии создавались и развивались новые подразделения Академии наук. Несмотря на тяжелейшие условия, за годы войны расширилась сеть экспериментальных научных учреждений, возросло число активно развиваемых высокосignимых научных направлений.

Как следует из названия книги, коллектив авторов в первую очередь уделил внимание именно военным годам жизни научных деятелей. Издание информирует читателя о том, где академики и члены-корреспонденты военных лет жили и работали, какие научные проблемы и в каких областях (оборонной, геолого-минералогической, медицинской, дипломатической и иных) решали. Краткие биографические статьи позволяют оценить работы членов академии, проследить по этапам их путь в науке.

Базой создания историко-биографической книги явились автобиографические материалы членов Академии наук СССР и отраслевые архивы. В приводимых библиографических данных описываются решения, принимавшиеся в период становления Академии наук СССР в довоенный период, а также в годы войны, деятельность учёных в эвакуации, их участие в послевоенном восстановлении народного хозяйства.

Великая Отечественная война раскрыла потенциал и возможности советской науки. АН СССР как государственный, научный и общественный институт испытала все трудности военного времени, и это нашло своё отражение в тексте статей. Патриотизм и жертвенность, проявленные советскими учёными во время эвакуации, их героическая деятельность по развёртыванию новых производств, проведение научных исследований в интересах фронта и промышленности показаны на конкретных примерах. Вклад героев книги в технические, гуманитарные исследования, открытие ими новых возможностей в передовых производственных технологиях двойного назначения прослеживаются как в отдельных статьях, так и в итоговом завершающем обзоре.

Краткие биографические статьи позволяют читателю получить концентрированную информацию о научном пути учёных, их важнейших работах и успехах их коллективов, отраслевой специфике деятельности. Значительный интерес представляют справки, раскрывающие информацию об уникальном вкладе того или иного учёно-

го, конкретной ситуации, повлиявшей на жизнь героя статьи. Эти дополнения — интересная находка авторов, помогающая расширить наши знания о жизни и деятельности учёных в СССР, а также социальной истории академического и научного сообщества первой половины XX в. В каждой статье присутствует общая справка об учёном, перечисляются его важнейшие открытия, работы и труды, приводится список изданий, даются комментарии. Активно используются данные из архивных фондов РАН, воспоминания современников, библиографические справки. В качестве примера приведу несколько статей, каждая из которых по-своему раскрывает историю Академии наук в лицах.

Ухтомский Алексей Алексеевич (13(25).06.1875–31.08.1942) [1, с. 789–791]. Физиолог, биолог, мыслитель, публицист, общественный и церковный деятель. Современник И.П. Павлова и ученик Н.Е. Введенского. Академик АН СССР (01.06.1935, Отделение математических и естественных наук; физиология). Директор Физиологического НИИ Ленинградского государственного университета (1934–1942). Один из основоположников физиологической школы Санкт-Петербургского университета. Автор учения о доминанте. Князь по рождению и при этом удостоен премии им. В.И. Ленина в 1932 г. В 1994 г. в память о его научном наследии была учреждена премия им. А.А. Ухтомского РАН, присуждаемая за выдающиеся работы в области физиологии нервной системы и физиологии трудовой деятельности.

В статье описывается жизненный путь Ухтомского и не менее интересный путь в науку — от богословия к физиологии. Окончив Московскую духовную академию, защитив диссертацию по богословию, он затем с успехом заканчивает физико-математический факультет Санкт-Петербургского университета. Пережив тернии революции 1917 г. и религиозного поиска (в 1931 г. тайно рукоположен иосифлянскими архиереями в епископа Охтинского), два ареста (в 1920 и 1923 гг.), Ухтомский приходит к созданию передовой научной школы в области физиологии. В 1941 г. Алексей Алексеевич Ухтомский остался в блокадном Ленинграде, участвовал в работах для нужд обороны, руководил актуальными для военного времени исследованиями по травматическому шоку [2].

История блокады Ленинграда прослеживается в трагичной ленте дней Академии наук военного периода. Множество судеб талантливых учёных, студентов и членов их семей оказались оборваны голодом, холодом и лишениями, выпавшими на долю ленинградского академического сообщества. Перед войной в 146 научных учреждениях города работало 5660 научных сотрудников. Многие из них не смогли или не захотели покинуть

осаждённый город. Их вклад в борьбу с врагом, как и вклад всех защитников Ленинграда, стал символом мужества и примером стойкости. Важно отметить, что в самые страшные месяцы блокады научное сообщество продолжало работать на будущую победу. Помимо собственных научных исследований сотрудники профильных институтов вели консультации для жителей по основам огородничества, обеспечению рассадой. В городе проводились научные исследования и практические эксперименты с целью усовершенствования системы обороны.

Вклад академического сообщества Ленинграда в дело Победы велик и достоин всенародной памяти. 26 июня 1945 г. в Ленинградской филармонии состоялось торжественное заседание Юбилейной сессии Академии наук, на которой выступили академики В.Л. Комаров, Л.А. Орбели, И.И. Мещанинов. Учёных горячо поздравляла научная общественность Ленинграда. В официальном приветствии говорилось: «В суровые дни для Ленинграда чёрные полчища немецко-фашистских врагов рвались к городу Ленина — городу русской революционной славы, науки, культуры и искусства. Когда враг железным кольцом голодной блокады пытался сломить упорство и стойкость жителей города, учёные вместе с героическими ленинградцами стали в ряды бесстрашных борцов и весь свой творческий ум и знания отдали делу победы».

Энциклопедия полна уникальных сюжетов по истории мировой науки первой половины XX столетия. Например, жизнь братьев Н.И. и С.И. Вавиловых вызывает раздумья о превратности судеб и проблеме столкновения талантливых учёных с жёсткой и даже жестокой административно-политической системой. Статьи, посвящённые братьям Орбели, наталкивают на размышления о человечности, понимании долга перед Родиной, необходимости для учёного определённости выбора между наукой и лженаукой [1, с. 686–689].

Орбели Леон Абгарович (25.06(07.07).1882–09.12.1958) и Орбели Иосиф Абгарович (08(20).03.1887–02.02.1961) родились в семье Абгара Иосифовича Орбели, выпускника юридического факультета Петербургского университета, и княжны Варвары Моисеевны Аргутинской. Их старший сын (физиолог) и его младший брат (лингвист) — примеры “физика и лирика”, “людей длинной воли” эпохи “больших вызовов”: двух чудовищных мировых войн и меняющих мир революций первой половины XX в.

В годы Великой Отечественной войны, оставаясь в блокадном Ленинграде, И.А. Орбели вёл работу по сохранению музейных ценностей. В 1941–1942 гг. руководил охраной и эвакуацией Эрмитажа и ленинградских учреждений АН СССР. В 1944 г. участвовал в работах Чрезвычайной комиссии по обследованию ленинградских пригородных дворцов с целью

установления ущерба, нанесённого немецкими фашистами; участвовал в работах по восстановлению Зимнего дворца и экспозиций Эрмитажа. В 1946 г. выступал свидетелем на Нюрнбергском процессе над главными немецкими военными преступниками.

Л.А. Орбели как начальник Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова в годы войны (1943–1950-е гг.) внёс большой вклад в организацию медицинской помощи Красной Армии. Ему удавалось сочетать административную работу с научной и клинической. В годы войны он изучал механизмы травматического шока, “воздушной контузии”, способы ликвидации контрактур, каузалгий¹. Исследовал проблемы боли, физиологии и патологии органов чувств, влияния на организм человека повышенного и пониженного барометрического давления, которые нашли применение в военной медицине. Сотни раненых воинов были им прооперированы в стенах Военно-медицинской академии и в прифронтовых госпиталях. Принимал деятельное участие в учреждении Академии медицинских наук СССР.

Глобальные конфликты, к которым относится Великая Отечественная война, меняют устоявшийся миропорядок, но одновременно служат проверкой на прочность государств и их институтов. СССР и его Академия наук с честью прошли эти испытания, несмотря на огромные жертвы и потери. В те годы особо значим был масштаб личности руководителей. С этой точки зрения заслуживает внимания статья о президенте Академии наук СССР этого периода [1, с. 611–614].

Комаров Владимир Леонтьевич (01(13).10.1869–05.12.1945). Президент АН СССР (29.12.1936–17.07.1945). Биография представляет нам человека, который достиг многого ещё в Российской империи, участвовал в становлении ботаники как науки, активно сотрудничал с Русским географическим обществом. В 1935–1945 гг. возглавлял Комиссию по заведованию филиалами и базами АН СССР. В 1930-х годах при участии Комарова были организованы Уральский и Закавказский филиалы (в 1935 г. преобразован в Армянский, Азербайджанский и Грузинский филиалы), Кольская и Северная базы, Туркменский и Узбекский филиалы, а в годы войны – Киргизский и Западно-Сибирский филиалы АН СССР.

Вместе с тем энциклопедия не ретуширует мрачный политический подтекст административной деятельности В.Л. Комарова в 1930-х годах (открытое письмо по вопросу “беспощадной расправы с подлыми предателями”, его позиция в отношении политических процессов над учёными, в том числе Н.И. Вавиловым). Но нельзя игнорировать и того факта, что именно при Кома-

рове Академия наук СССР приобрела свой классический вид, её авторитетная роль была признана высшим руководством страны. Будучи к началу войны уже немолодым человеком, Владимир Леонтьевич в августе 1941 г. возглавил Комиссию АН СССР по мобилизации ресурсов Урала (с апреля 1942 г. переименована в Комиссию АН СССР по мобилизации ресурсов Урала, Западной Сибири и Казахстана на нужды обороны страны), активно занимался мобилизацией научно-исследовательского потенциала Академии наук на нужды фронта, руководил эвакуацией и возвращением из неё учреждений и специалистов. Несмотря на тяжёлую болезнь, успешно руководил академией, усилив её влияние и во многом заложив основу послевоенного развития и расцвета одного из ведущих научных центров мира.

Биографические статьи энциклопедического издания убедительно свидетельствуют о том, что в самый тяжёлый первый период войны академики и члены-корреспонденты АН СССР, сотрудники лабораторий и других научных подразделений, аспиранты и студенты способствовали максимальному использованию научного опыта на важнейших оборонных направлениях. Изучение истории Победы, преодоления острейших проблем военного времени и последующего восстановления страны, в чём активно участвовали академические учёные, оказывается далеко не полным без рассмотрения их жизненного пути. Вглядеться в их судьбы помогает новая энциклопедия. Глубже осознав, кем были академики Победы, мы, смею предположить, сможем понять, как нам сохранить и приумножить влияние академического сообщества на общественные процессы, стать по-настоящему достойными наследниками своих предшественников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Д.О., Мелуа А.И., Ноздрачев А.Д. Академики Победы / Под общей ред. профессора А.И. Мелуа. СПб.: Гуманистика, 2020.
2. Соколова Л.В., Ноздрачев А.Д. “Небесная физиология” // Вестник РАН. 2020. № 6. С. 583–592.
3. Левшин Б.В. Академия наук СССР в годы Великой Отечественной войны (1941–1945). М.: Наука, 1983.
4. Учёные и Великая Отечественная война. Материалы круглого стола в рамках XXXVI годичной международной научной конференции “Советская наука и техника в годы Великой Отечественной войны (К 70-летию Великой Победы)” Санкт-Петербургского отделения Российского национального комитета по истории и философии науки и техники (21 апреля 2015 г.). СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016.
5. Черешнев В.А. Академия наук в годы Великой Отечественной войны. М.: РБОФ “Знание” им. С.И. Вавилова, 2010.
6. Князев Г.А., Кольцов А.В. Краткий очерк истории Академии наук СССР. М.–Л.: Наука, 1957.

¹ Каузалгия — болевой синдром, обусловленный повреждением некоторых периферических нервов и характеризующийся интенсивными жгучими болями, сосудодвигательными и трофическими расстройствами в зоне иннервации поражённого нерва.