



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» Физический факультет



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» Филиал в Севастополе

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР
«ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ГЕОСРЕДАХ»

ДЕВЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ШКОЛА
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
В ГЕОСРЕДАХ**

МОСКВА, ИПМЕХ РАН, 18-20 ОКТЯБРЯ 2023

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИИ
NINTH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE - SCHOOL
FOR YOUNG SCIENTISTS

**PHYSICAL AND MATHEMATICAL
MODELING OF PROCESSES
IN GEOMEDIA**

MOSCOW, IPMECH RAS, OCTOBER 18-20, 2023
PROCEEDINGS
МОСКВА 2023

УДК 531 + 532 + 556 + 550.3 + 550.8

ББК 22.2 + 22.3 + 26.2

В

Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Девятая международная научная конференция-школа молодых ученых; 18-20 октября 2023 г., Москва: Материалы конференции. – М.: ИПМех РАН, 2023– 186 с.

ISBN 978-5-91741-288-7

В сборнике материалов конференции представлены доклады участников 9-ой Международной научной конференции-школы молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» в виде коротких статей. Тематика Школы охватывает широкий спектр фундаментальных и прикладных исследований процессов во всех природных средах: в недрах Земли, океане, атмосфере. Центральное место в работе Школы занимают вопросы, связанные с разработкой месторождений углеводородного сырья. Большое внимание уделено исследованию течений в сложных неоднородных жидкостях, экологическим проблемам, изучению антропогенного вклада в динамику природных систем.

Ключевые слова: процессы в геосредах, математическое и лабораторное моделирование, нефтяные и газовые месторождения, неоднородные жидкости, течения в сложных средах.

УДК 531 + 532 + 556 + 550.3 + 550.8

ББК 22.2 + 22.3 + 26.2

Key words: geomedia, mathematical and laboratory modelling, oil and gas production, inhomogeneous fluids, fluxes in complex media.



ОРГАНИЗАТОРЫ ШКОЛЫ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» Филиал в Севастополе

ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ШКОЛЫ:

теоретические и экспериментальные исследования процессов в атмосфере, океане, литосфере, их взаимодействия;

широкий круг проблем, связанных с добычей углеводородного сырья;

экологические проблемы окружающей среды;

проблемы антропогенного воздействия на окружающую среду;

методы геофизических исследований.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель – академик Д.М. Климов (ИПМех РАН), заместитель председателя – д.т.н. В.И. Карев (ИПМех РАН), заместитель председателя – профессор К.В. Показеев (МГУ), ученый секретарь – д.ф.-м.н. Т.О. Чаплина (ИПМех РАН), профессор Л.А. Абукова (ИПНГ РАН), профессор В. Бабанин (Технологический Университет Суинберн, Австралия), академик НАН Армении В.Н.Акопян (Институт механики Национальной академии наук, Армения), Dr. Ian Gray (Siga, Австралия), академик И.Г.Горячева (ИПМех РАН), академик А.Н. Дмитриевский (ИПНГ РАН), чл.-корр. РАН П.О. Завьялов (ИО РАН), профессор А.С. Запевалов (МГИ РАН), профессор Зацепин А.Г. (ИО РАН), профессор И.А.Знаменская (МГУ), д.ф.-м.н. А.В. Кистович (ИПМех РАН), д.ф.-м.н. Ю.Ф. Коваленко (ИПМех РАН), профессор Б.В. Лапшин (МГУ, ИПГ Росгидромета), академик В.П. Матвеев (ИМСС УРО РАН), профессор Л.А.Назарова (ИГД СО РАН), академик Р.И. Нигматулин (ИО РАН), профессор В.Н. Носов (ГЕОХИ РАН), профессор И.А.Репина (ИФА РАН), профессор А. Саакян (Институт механики Национальной академии наук, Армения), профессор Н.Н. Сысоев (МГУ), профессор Б.Г.Тарасов (Университет Западной Австралии), профессор В.В. Фадеев (МГУ), чл.-корр. РАН Н.Н. Филатов (ИВПС КарНЦ РАН), директор Филиала МГУ в Севастополе О.А Шпырко, профессор А.А. Шрейдер (ИО РАН), чл.-корр. РАН С.Е. Якуш (ИПМех РАН), профессор Р. Янг (Университет Торонто, Канада).

Статьи в сборнике опубликованы в соответствии с материалами, предоставленными авторами, ответственность за достоверность и авторство содержания полностью лежит на авторах.

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ШКОЛЫ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1

ORGANIZERS OF THE SCHOOL

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences

Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University

Lomonosov Moscow State University Branch in Sevastopol

SCIENTIFIC PROGRAM TOPICS:

theoretical and experimental studies of processes in the atmosphere, ocean, lithosphere and their interactions;

a wide range of problems associated with hydrocarbon production;

ecological problems of the environment;

problems of human impact on the environment;

methods of geophysical research.

Articles in the book are published in accordance with the materials provided by the authors, the responsibility for the accuracy and authorship of the content is completely assigned to the authors.

SCHOOL VENUE

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS

119526, Russia, Moscow, Vernadskogo avenue, 101-1

роли таких рабочих жидкостей может выступать, например, фреон, один из видов которого (фтордихлорбромметан) кипит уже при 51.9 °С. В 2006 году в Чина-Хот-Спрингс, штат Аляска, заработала станция бинарного цикла, производящая электричество с рекордно низкой температурой жидкости 57 °С.

Если же рассматривать модель с большим геотермическим градиентом (например, 50 °С/км), то искомая температура на забое будет 150 °С и выше. При таких температурах утилизация петротермальных ресурсов для целей энергетики и, особенно, теплоснабжения становится актуальной и рентабельной. Однако такие высокие градиенты температуры редко встречаются на территории России. Они обнаруживаются только на территории Северного Кавказа (Ставропольский свод, Восточное Предкавказье), в некоторых районах Западной Сибири, в Тункинской впадине Прибайкалья и в Курило-Камчатском регионе.

Что касается мировой практики, то, например, на станции Сульц-су-Форе к 1995 году были пробурены скважины глубиной до 3.9 км. Температура добываемой воды составляла 136 °С, при тепловой мощности 9 МВт. К 2003 году скважины углубили до 5.1 км. На выходе из коллектора удалось получить теплоноситель с температурой около 160 °С. Было начато строительство электростанции, которая была запущена в сентябре 2016 года и с тех пор успешно эксплуатируется в непрерывном режиме. Её электрическая мощность составляет 1.7 МВт.

Общий экономический потенциал месторождений термальных вод в России оценивается в 50.1 миллионов тонн у.т./год при традиционной фонтанной эксплуатации и в 114.9 миллионов тонн у.т./год - при ГЦС эксплуатации.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы Лаборатории теплопереноса ГИН РАН №122012700311-2.

Литература/References:

1. Хуторской М.Д., Керимов В.Ю., Косьянов В.А. Возобновляемая и нетрадиционная энергетика - мировые и отечественные тенденции развития. Монография. Москва, 2021. 208 с.
2. Геотермальная энергетика: как тепло Земли превратили в эффективный энергоресурс. - <https://habr.com/ru/companies/toshibarus/articles/442632/>
3. Официальный сайт ComsolMultiphysics по созданию моделей методом конечных элементов. - <https://www.comsol.ru/model/geothermal-doublet-29751>
4. Алхасов А. Б. Возобновляемые источники энергии. М.: Изд. дом МЭИ. 2016. 256с.

ПЕРСПЕКТИВЫ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ РОССИИ: РАСЧЕТ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ЗАТРАТ

Дегтярев К.С.¹, Березкин М.Ю.¹, Показеев К.В.², Соловьев Д.А.³

¹Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, kir1111@rambler.ru,
mberezkin@inbox.ru

²Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, РФ, sea@phys.msu.ru

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, РФ, solovev@ocean.ru

Проводится анализ перспектив углеродной нейтральности на основе идей концепции перехода к ноосферному этапу эволюции человечества, основанному на гармоничном взаимодействии человека и природы. Предложена методика расчета инвестиционных затрат на достижение углеродной нейтральности в России. Рассматривается девять сценариев с разными объемами энергопотребления и различными долями неуглеродных источников энергии (атомной, гидравлической, ветровой и солнечной) с оценкой потребности в генерирующих мощностях и инвестиционных затратах для каждого сценария. Показано, что сумма инвестиционных затрат

на обеспечение углеродной нейтральности без учета поглощающей способности экосистем варьируется от 200 трлн до 350 трлн рублей (от 5 до 9 трлн рублей в год) и представляет собой значительный вызов для российской экономики. В заключении подчеркивается важность поддержки со стороны государства, разработки эффективной энергетической политики и мобилизации финансовых ресурсов для исследований и разработки новых технологий.

В докладе «Преодолевая пределы» идея перехода к ноосферному этапу эволюции человечества, основанная на современных исследованиях в областях науки (кибернетики, биологии и геофизики), подразумевает более гармоничное сосуществование человека и окружающей среды, учитывая ограниченные ресурсы и необходимость устойчивого развития [1], [2]. Это концептуальное представление о будущем человечества может вдохновить стратегии по решению климатических и энергетических проблем [2]. Переход к ноосферному этапу эволюции подразумевает гармоничное взаимодействие человека и природы, а также осознанное использование ресурсов [3]. Это вполне согласуется с концепцией углеродной нейтральности, которая направлена на устойчивое сокращение выбросов парниковых газов, в первую очередь углерода, и на компенсацию оставшихся выбросов через поглощение углерода. Такой подход способствует уменьшению негативного воздействия человеческой деятельности на климат и окружающую среду. Исследования в областях кибернетики, биологии и геофизики могут способствовать разработке новых методов и технологий для достижения углеродной нейтральности, таких как более эффективные источники возобновляемой энергии, улучшенные методы углеродного секвестрования и технологии восстановления экосистем. Переход к углеродной нейтральности представляет собой значимый шаг в направлении устойчивого развития и снижения воздействия на окружающую среду [4], однако для его успешной реализации требуются дополнительные научные исследования и разработки. Важно рассмотреть некоторые ключевые аспекты этого сценария (по [4]):

Доля ВИЭ (возобновляемых источников энергии). Увеличение доли ВИЭ в общем энергобалансе до более чем 40% к 2060 году означает значительное сокращение зависимости от ископаемых углеводородов, таких как нефть и уголь. Это позволит снизить выбросы парниковых газов и изменить энергетический ландшафт в сторону более чистых источников энергии.

Атомная энергетика. Увеличение доли ядерной энергетики в энергобалансе также предполагает большую роль атомной энергии в будущей энергетике. Атомная энергетика имеет низкие уровни выбросов парниковых газов, но также связана с рядом сложностей, включая управление радиоактивными отходами и безопасность.

Технологические и инфраструктурные изменения. Реализация амбициозных сценариев требует значительных технологических инноваций и инфраструктурных изменений. Необходимо разработать эффективные технологии хранения энергии, улучшить сетевую инфраструктуру и создать условия для расширения возобновляемых источников энергии.

Энергетическая политика и финансирование. Для успешной реализации такого перехода важна поддержка со стороны государства, разработка эффективной энергетической политики и обеспечение финансирования на исследования, разработку и внедрение новых технологий.

Социальное принятие. Успех энергетического перехода также зависит от социального принятия и поддержки общества. Важно обеспечить информированность общества о выгодах и рисках новых энергетических решений.

Создание методик оценки инвестиционных затрат на переход к углеродной нейтральности является важным этапом в реализации сценария глобального энергетического перехода. Расчет инвестиционных затрат позволяет более эффективно распределить ресурсы между различными проектами и мероприятиями, направленными на снижение выбросов парниковых газов. Это помогает избежать излишних затрат и обеспечить максимальную эффективность в достижении целей углеродной нейтральности. Что касается экономики России, расчет инвестиционных затрат на переход к углеродной нейтральности имеет особую важность. В первую очередь это связано с тем, что Россия является одной из крупнейших экономик мира и одним из ведущих производителей и потребителей энергии, основанной на ископаемых источниках. По данным

Международного энергетического агентства, в 2020 году Россия занимала четвертое место в мире по объему выбросов парниковых газов (ПГ), составивших 1,6 млрд тонн CO₂-эквивалента [5]. Переход к углеродной нейтральности потребует значительных изменений в структуре энергетического сектора и других отраслях экономики, связанных с выбросами ПГ. Оценка инвестиций поможет разработать стратегии для адаптации к этим изменениям. Россия обладает значительным потенциалом в области возобновляемых источников энергии, в первую очередь, таких как солнечная и ветровая энергия [6]. Расчет инвестиций может помочь определить, какие ресурсы и финансирование необходимы для развития использования этих источников.

Предлагаемая методика расчёта была нами ранее апробирована в [7], [8] и использует следующие исходные допущения:

Не учитывается поглощающая способность экосистем – в виду высокой степени неопределённости в данном вопросе, а также исходя из преобладающих в мире подходов, предполагающих учёт именно антропогенной эмиссии и её непосредственного снижения, предполагается, что углеродная нейтральность достигается исключительно за счёт сведения к нулю антропогенных выбросов ПГ (парниковых газов)) [9];

Нулевая эмиссия ПГ будет достигнута к 2060 году;

Энергопотребление в стране должно быть полностью обеспечено за счёт электроэнергии, вырабатываемой на электростанциях, работающих на неуглеродных источниках – атомных станциях и ВИЭ (гидро-, ветровых и солнечных).

По состоянию на 2021 год энергопотребление в России оценивается на уровне 1180 млн тонн условного топлива [10] – что соответствует 9 600 ТВтч, или $9600 \cdot 10^9$ кВтч; по данным [11] оно составило $8700 \cdot 10^9$ кВтч. По данным [10], наблюдается плавная тенденция к росту потребления энергии в России: 948 млн т.у.т в 2005 году, 1 043 млн в 2010, 1 071 млн в 2015 и 1 180 млн в 2021. По данным, приведённым в [11], фиксируется аналогичная тенденция – рост с менее 26 ЭДж (7 222 ТВтч) в 2000 году до более 31 ЭДж в 2021.

Мы последовательно рассматриваем сценарии, в которых средний годовой объём энергопотребления в стране составляет 8 000, 10 000 и 12 000 ТВтч.

Отметим, что первый сценарий, при котором энергопотребление в 2060 году окажется ниже нынешнего уровня, также вероятен, учитывая возможности развития технологий энергосбережения в энергоёмких отраслях и на уровне ЖКХ. Также отметим, что с начала XXI века душевое энергопотребление в США, Западной Европе и Японии снижается со скоростью 0,5%-1% в год (по данным [11]); в Японии, при сокращении численности населения, потребление энергии снижается и в абсолютных единицах.

В настоящее время в РФ примерно 1140 ТВтч [11], или 13% всего энергопотребления, округлённо – 1200 ТВтч, обеспечивается неуглеродными источниками.

Таким образом, в качестве допущения нами предполагается, что, в зависимости от сценария, требуется дополнительно обеспечить за счёт электроэнергии, получаемой из неуглеродных источников:

$8\,000 - 1\,200 = 6\,800$ ТВтч ($6800 \cdot 10^9$ кВтч);

$10\,000 - 1\,200 = 8\,800$ ТВтч ($8800 \cdot 10^9$ кВтч);

$12\,000 - 1\,200 = 10\,800$ ТВтч ($10800 \cdot 10^9$ кВтч).

Для каждого из этих вариантов нами рассмотрены три сценария, предполагающие различные доли разных источников – атомной, гидравлической, ветровой и солнечной энергии, в данных объёмах производства. Таким образом, нами рассматривается 9 сценариев для разных объёмов энергопотребления и различных долей разных неуглеродных источников (табл. 1).

Доли разных источников энергии в сценариях были выбраны на основе следующих соображений:

Атомная энергия является одним из наиболее эффективных и надёжных неуглеродных источников энергии, которые могут обеспечить высокий уровень энергетической безопасности и независимости России. Атомная энергетика также имеет высокий коэффициент использования

установленной мощности (КИУМ), что позволяет снизить инвестиционные затраты на единицу производимой электроэнергии. Поэтому во всех сценариях атомная энергия занимает 40-50% от общего объема производства электроэнергии из неуглеродных источников.

Гидроэнергия также является важным неуглеродным источником энергии, который имеет ряд преимуществ, таких как возобновляемость, относительно низкие эксплуатационные затраты и возможность регулирования нагрузки. Россия обладает значительным гидроэнергетическим потенциалом, который может быть использован для увеличения доли гидроэнергии в энергобалансе. Во всех сценариях гидроэнергия составляет 30-40% от общего объема производства электроэнергии из неуглеродных источников.

Ветровая и солнечная энергия являются перспективными возобновляемыми источниками энергии, которые могут способствовать диверсификации энергетического микса и снижению зависимости от импорта топлива. Однако, эти источники имеют низкий КИУМ и зависят от природных условий, что требует разработки эффективных технологий хранения и передачи электроэнергии. В разных сценариях ветровая и солнечная энергия занимают от 5 до 15% от общего объема производства электроэнергии из неуглеродных источников.

Существующий уровень развития и инфраструктуры для каждого источника энергии. Так, атомная и гидроэнергетика имеют более высокую скорость развития, чем ветровая и солнечная энергетика, так как Россия уже имеет значительный опыт и ресурсы в этих областях.

Потенциал и перспективы для каждого источника энергии. Ветровая и солнечная энергетика имеют больший потенциал для роста, чем атомная и гидроэнергетика, так как Россия располагает большими территориями с высокими ресурсами ветра и солнца.

Таблица 1. Сценарии с разными объёмами энергопотребления и различными долями разных источников энергии

Источник	Сценарий 1 – 6 800 ТВтч		
	Сценарий 1.1.	Сценарий 1.2.	Сценарий 1.3.
Атомная энергия	50%	40%	40%
Гидроэнергия	40%	40%	30%
Ветровая энергия	5%	10%	15%
Солнечная энергия	5%	10%	15%
Источник	Сценарий 2 – 8 800 ТВтч		
	Сценарий 2.1.	Сценарий 2.2.	Сценарий 2.3.
Атомная энергия	50%	40%	40%
Гидроэнергия	40%	40%	30%
Ветровая энергия	5%	10%	15%
Солнечная энергия	5%	10%	15%
Источник	Сценарий 3 – 10 800 ТВтч		
	Сценарий 3.1.	Сценарий 3.2.	Сценарий 3.3.
Атомная энергия	50%	40%	40%
Гидроэнергия	40%	40%	30%
Ветровая энергия	5%	10%	15%
Солнечная энергия	5%	10%	15%

Технологические и экономические условия для каждого источника энергии. Атомная и гидроэнергетика требуют больших инвестиций и длительных сроков строительства, чем ветровая и солнечная энергетика, которые могут быть более гибкими и масштабируемыми.

Экологические и социальные последствия для каждого источника энергии. Например, атомная энергетика связана с рисками управления радиоактивными отходами и безопасности, а гидроэнергетика может оказывать негативное воздействие на окружающую среду и население.

Ветровая и солнечная энергетика имеют меньший уровень выбросов парниковых газов и меньше влияют на экосистемы.

Таким образом, в сценариях при выборе долей разных источников учитывается комплексный подход к оценке возможной скорости развития в России разных источников энергии, основанный на анализе различных аспектов: технических, экономических, экологических и социальных.

Исходя из объёма выработки электроэнергии данным источником, нами была рассчитана потребность в генерирующих мощностях на основе данных по среднему коэффициенту использования установленной мощности (КИУМ) для электростанций данных типов. По данным [12], КИУМ электростанций в России составил (округлённо до целых): АЭС – 84%, ГЭС – 48%, ВЭС – 28%, СЭС – 14%. Формула расчёта в данном случае: $C = P/8760 \cdot \text{КИУМ}$, где: C – требуемые мощности, ТВт; P – производство электроэнергии, ТВт·ч, 8760 – время, соответствующее 1-му году в часах, КИУМ – коэффициент использования установленной мощности (отношение количества фактически выработанной электроэнергии к тому количеству электроэнергии, которое было бы выработано, если бы электростанция работала с нагрузкой, соответствующей ее установленной мощности), %.

Рассмотрим расчёт потребностей в энергетических мощностях на примере сценария 1.1 (табл. 2), производство 6 800 ТВтч должно быть обеспечено в соотношении: 50% - за счёт АЭС, 40% - ГЭС, по 5% - ВЭС и СЭС.

Таблица 2. Пример расчёта потребностей в энергетических мощностях

Источник	Общая потребность в производстве ЭЭ, ТВтч	Доли источников в производстве ЭЭ, %	Производство за счёт каждого источника, ТВтч (10^9 кВтч)	КИУМ, %	Требуемые мощности, кВт
АЭС	6 800	50%	3 400	84%	$462 \cdot 10^6$
ГЭС		40%	2 720	48%	$647 \cdot 10^6$
ВЭС		5%	340	28%	$139 \cdot 10^6$
СЭС		5%	340	14%	$277 \cdot 10^6$

Далее, исходя из имеющихся данных по удельным инвестиционным затратам (на единицу установленной мощности): АЭС – 180 000 руб./кВт, ГЭС – 140 000 руб./кВт, ВЭС – 85 000 руб./кВт, СЭС – 65 000 руб./кВт [13], [14] (соответственно, и умножая эти величины на общие величины требуемых мощностей (табл. 2), рассчитываем общую величину инвестиционных затрат. Рассмотрим этот расчёт также на примере сценария 1.1. (табл. 3).

Таблица 3. Пример расчёта требуемых инвестиционных затрат

Источник	Требуемые мощности, кВт (табл. 4)	Удельные инвестиционные затраты, млн. руб./кВт	Общие инвестиционные затраты, млрд руб.
АЭС	$462 \cdot 10^6$	180 000	83 170
ГЭС	$647 \cdot 10^6$	140 000	90 563
ВЭС	$139 \cdot 10^6$	85 000	11 782
СЭС	$277 \cdot 10^6$	65 000	18 020
Всего	$1\,525 \cdot 10^6$	-	203 536

Аналогичным образом рассчитываем потребности в генерирующих мощностях для каждого из обозначенных выше сценариев (табл.1).

Расчёты по обозначенным выше сценариям показывают, что сумма инвестиционных затрат на обеспечение углеродной нейтральности без учёта поглощающей способности экосистем варьируется от 200 трлн до 350 трлн рублей (рис. 1), или от 5 до 9 трлн. рублей в год (от 3% до 6% ВВП), исходя из срока её достижения к 2060 году.

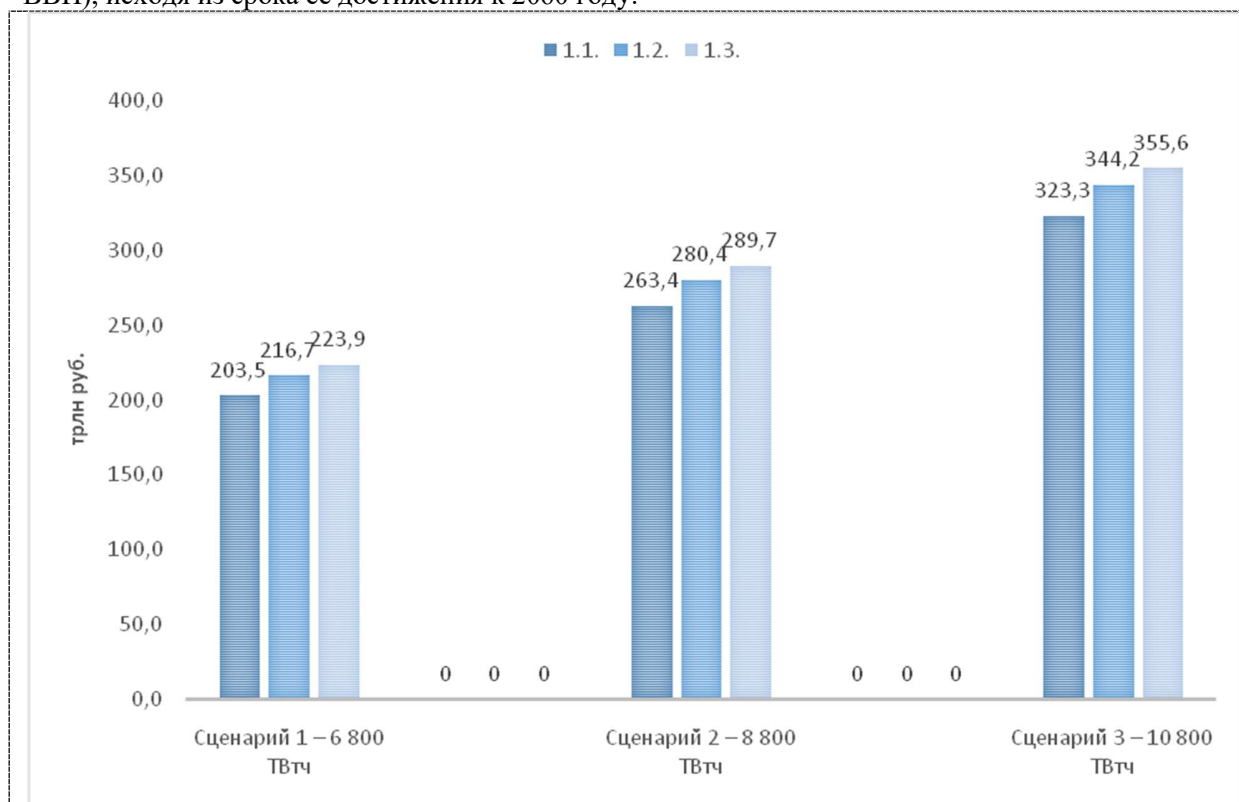


Рисунок 1. Результаты расчёта затрат на энергетический переход к углеродной нейтральности в России в зависимости от сценария. Источник: расчёты авторов.

По оценкам, приведённым ВТБ-Капитал, инвестиционные затраты России на переход к углеродной нейтральности могут составить величину, превышающую 400 трлн. рублей (около \$5 млрд.) [15].

Наши оценки близки оценкам ВТБ-Капитал и нашим предыдущим оценкам, но примерно в 3-5 раз превосходят цифры, указанные в Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (далее Стратегия). В то же время, согласно Стратегии, сокращение антропогенных выбросов ПГ должно обеспечить всего 30% их общего снижения [16]. Очевидно, что инвестиции, требуемые для перехода к углеродной нейтральности, представляют собой значительный вызов для российской экономики. Однако, высокий коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) у атомных и гидроэлектростанций может частично компенсировать высокие инвестиционные затраты.

Проведенные расчеты позволяют выбрать оптимальный путь энергетического перехода к углеродной нейтральности России, потому что они учитывают различные факторы, влияющие на эффективность и экономичность разных источников энергии. Среди этих факторов для каждого источника энергии можно выделить: существующий уровень развития и инфраструктуры; потенциал и перспективы; технологические и экономические условия; экологические и социальные последствия.

Таким образом, результаты приведенных расчетов позволяют сравнить разные сценарии энергетического перехода и выбрать тот, который обеспечивает максимальную эффективность в достижении целей углеродной нейтральности при минимальных затратах и рисках.

Полученные результаты имеют важное значение для выбора оптимального пути перехода к углеродной нейтральности России. Они позволяют более эффективно распределить ресурсы между различными проектами и мероприятиями, направленными на снижение выбросов парниковых газов. Они также помогают избежать излишних затрат и обеспечить максимальную эффективность в достижении целей углеродной нейтральности. Кроме того, они способствуют развитию новых технологий и инноваций в области энергетики, которые могут повысить конкурентоспособность российской экономики на мировом рынке.

Для реализации целей энергетического перехода потребуется активная поддержка со стороны государства, разработка эффективной энергетической политики и мобилизации финансовых ресурсов для исследований и разработки новых технологий. Также необходимо обеспечить информированность и поддержку общества по вопросам углеродной нейтральности и ее выгод для экономики и окружающей среды.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках госзаданий FMWE-2023-0001 и 121051400082-4

Литература/References:

1. Садовнический В.А., Аскаров А.А. Мировое развитие и «пределы роста» в XXI веке: моделирование и прогноз [Электронный ресурс]. . 2022URL: <https://expert.msu.ru/haos22-1?> (дата обращения: 20.10.2022).
2. Показеев К.В., Соловьев Д.А. «ПРЕОДОЛЕВАЯ ПРЕДЕЛЫ» – НОВЫЙ ПРОЕКТ РЕШЕНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Восьмая международная научная конференция-школа молодых ученых; 12-14 октября 2022 г., Москва: Материалы конференции. Москва: ИПМех РАН, 2022. С. 141–144.
3. Садовнический В.А., Акаев А.А., Ильин И.В., Коротаев А.В., Малков С.Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики в XXI веке (препринт). Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022.
4. Акаев А.А., Давыдова О.И. Парижское климатическое соглашение вступает в силу. Состоится ли Великий энергетический переход? // Вестник Российской академии наук. 2020. № 10(90). С. 926–938.
5. Россия будет добиваться углеродной нейтральности к 2060 году [Электронный ресурс]. . 2021URL: <https://news.un.org/ru/story/2021/10/1411842> (дата обращения: 31.08.2023).
6. Андреев Т.И., Габдрахманова Т.С., Данилова О.В. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание. Москва: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015.
7. Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А. Подходы к оценке инвестиционных затрат на глобальный энергетический переход // Окружающая среда и энергетическое развитие. 2022. № 1. С. 4–17.
8. Дегтярёв К.С., Соловьев Д.А., Березкин М.Ю. Подходы к оценке затрат на переход к низкоуглеродному развитию в России // Энергетическая политика. 2023. № 6(184). С. 100–110. DOI:10.46920/2409-5516_2023_6184_100.
9. Замолдчиков Д.Г. Углеродный цикл и изменения климата // Окружающая среда и энергетическое развитие. 2021. № 2. С. 53–69.
10. Баланс энергоресурсов 2005-2021 [Электронный ресурс]. . 2023URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/elbalans_2022.xlsx (дата обращения: 14.08.2023).
11. Statistical Review of World Energy [Электронный ресурс]. . 2023URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (дата обращения: 14.08.2023).

12. Отчёт о функционировании ЕЭС России в 2021 году [Электронный ресурс]. . 2022 URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf (дата обращения: 14.08.2023).
13. Система государственного стимулирования хранения электроэнергии в России [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/489> (дата обращения: 14.08.2023).
14. Росатом предварительно обозначил предельную стоимость капитального строительства одного атомного кВт в 183 тыс. рублей [Электронный ресурс]. . 2022 URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/01/25/121255> (дата обращения: 14.08.2023).
15. ВТБ Капитал представил оценку стоимости декарбонизации для российской экономики и ее отраслей [Электронный ресурс]. . 2021 URL: <https://bankinform.ru/news/117904> (дата обращения: 14.08.2023).
16. Порфирьев Б.Н., Широков А.А. Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов: сценарии и реалии для России // Вестник Российской академии наук. 2022. № 5(92). С. 415–423.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ЛИТОСФЕРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ ИНТЕНСИВНОГО ВИХРЯ В МАНТИИ ПОД ОБЛАСТЬЮ СРЕДИЗЕМНОГО МОРЯ

С.Ю. Касьянов

Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, skas53@yandex.ru

В докладе обсуждается возможность построения на основе данных о рельефе литосферы оценки радиальной и азимутальной компонент скорости на верхней границе выхода горячего интенсивного внутримантийного вихря под восточной частью Средиземного моря [1].

Внутримантийный вихрь под восточной частью Средиземного моря представляет собой выход к дневной поверхности окончания крупномасштабного энергонесущего вихря Йеллоустон-Средиземное море [1] и имеет циклоническую циркуляцию.

Рассматривается модельная задача о нахождении стационарного осесимметричного течения идеальной жидкости на горизонтальной верхней границе цилиндрической области при постоянном во времени давлении, распределение которого задается модельным рельефом литосферы. Используется модельный осесимметричный рельеф, который строится на основе данных о реальном рельефе литосферы восточной части Средиземного моря с учетом его основных особенностей.

Рассматриваются уравнения движения указанной модельной задачи и находится их стационарное осесимметричное решение. С учетом циклонического характера циркуляции крупномасштабного энергонесущего вихря Йеллоустон-Средиземное море из двух возможных стационарных осесимметричных решений уравнений движения выбирается решение, описывающее циклоническую циркуляцию на границе внутримантийного вихря.

Циркуляция на верхней границе вихря резко разделяется на «глаз» вихря с медленным вращением и значительной положительной радиальной скоростью в центральной части вихря и относительно медленно вращающуюся периферическую часть со значительной отрицательной радиальной скоростью вихря. Азимутальная компонента скорости в периферической части вихря нарастает от периферии к центру по мере приближения к границе области «глаза» вихря, на границе «глаза» вихря достигает максимальных значений и претерпевает разрыв.

Сопоставление полученной структуры циркуляции в вихре с картой изостатических гравитационных аномалий показывает, что рельеф восточной части Средиземного моря образовался под влиянием выхода крупномасштабного энергонесущего вихря Йеллоустон-Средиземное море [1] и его эллипсообразная форма определяется пересечением цилиндрического энергонесущего вихря с поверхностью сферы дневной поверхности Земли. Областям минимума изостатических гравитационных аномалий соответствует область внешней окрестности стены