

2025
№2(26)

Окружающая среда и энергостудение

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)



<http://www.jeees.ru>

ISSN 2658-6703
(Online)

Окружающая среда и энергосистемы

Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)

2025 №2(26)

Научный, образовательный, культурно-просветительский сетевой журнал
Scientific, educational, cultural and educational network Journal

Основан в 2018 году,
1-й номер вышел в январе 2019 г.
Выходит четыре раза в год
при научно-информационной поддержке
Географического факультета МГУ
имени М.В. Ломоносова.

Founded in 2018,
The 1st issue was released in January 2019.
Published four times a year with scientific and
information support
Geographical faculty of Lomonosov Moscow
State University.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации Эл № ФС 77 - 74521 от 7 декабря 2018 г.

Индексируется в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU, Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка», Public Knowledge Project, Open Archives Initiative, OpenAIRE.

С 12 февраля 2024 г. включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук ВАК Минобрнауки России по специальности 1.6.21. Геоэкология (географические науки).



Главный редактор

Залиханов Михаил Чоккаевич, д.г.н., профессор,
академик РАН (МГУ им. М. В. Ломоносова).

Зам. главного редактора

Дегтярев Кирилл Станиславович, к.геогр.н
(МГУ им. М. В. Ломоносова)

Ответственный секретарь

Соловьев Дмитрий Александрович, к. ф.-м.н.
(ИО РАН).

Редакционная коллегия:

Бабурин Вячеслав Леонидович, д.г.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Безруких Павел Павлович, д.т.н., академик-секретарь РИА (МЭИ)
Березкин Михаил Юрьевич, к.геогр.н (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Бушуев Виталий Васильевич, д.т.н., профессор (ГУ Институт энергетической стратегии).
Гулев Сергей Константинович, д.ф.-м.н., профессор академик РАН (ИО РАН).
Дегтярев Кирилл Станиславович, к.геогр.н (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Добролюбов Сергей Анатольевич, д.геогр.н., профессор, академик РАН (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Залиханов Алим Михайлович, к.геогр.н, (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Киселева Софья Валентиновна, к.ф.-м.н. (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Красовская Татьяна Михайловна, д.геогр.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Моргунова Мария Олеговна, к.э.н. (KTH Royal Institute of Technology, Sweden).
Нефедова Людмила Вениаминовна (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Нигматулин Роберт Искандрович, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН (ИО РАН).
Панченко Владимир Анатольевич, к.т.н., доцент (Российский университет транспорта (МИИТ))
Показеев Константин Васильевич, д.ф.-м.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Рафикова Юлия Юрьевна, к.геогр.н. (МГУ им. М.В. Ломоносова)
Соловьев Дмитрий Александрович, к. ф.-м.н. (ИО РАН).
Слипенчук Михаил Викторович, д.э.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Тикунов Владимир Сергеевич, д.геогр.н., профессор (МГУ им. М. В. Ломоносова).

Адрес редакции:

119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, к. 19, НИЛ
возобновляемых источников энергии географического факультета
МГУ им. М.В.Ломоносова
Тел./ факс +7 (499) 939-42-57
e-mail: info@jeees.ru
Официальный сайт журнала <http://jeees.ru>

Окружающая среда и энергетическое развитие. 2025 №2(26)

Научный, образовательный, культурно-просветительский сетевой
журнал (периодическое сетевое издание)
Редактор К.С.Дегтярев
Корректор К.Г.Горошкин
Верстка М.Ю.Березкин
Перевод на английский язык
К.С.Дегтярев
Подписан в свет 15.07.2025.

Издатель:

ООО "Глобализация и устойчивое развитие. Институт
энергетической стратегии"
125009, г. Москва, Дегтярный переулок, д. 9, офис 011.
Тел./факс: +7 (495) 229-4241 доб. 224.
E-mail: guies@guies.ru.

Перепечатка или воспроизведение материалов
номера любым способом полностью или по частям
допускается только с письменного разрешения Издателя.

Учредитель: Соловьев Д.А.

© Редакция журнала

«Окружающая среда и энергетическое развитие», 2025

Государственный Рубрикатор НТИ России
(ГРНТИ): 37; 39; 44; 45

Содержание

Андреев Т.И., Дегтярев К.С., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Энергетический потенциал осадков сточных вод в регионах России	4
Дегтярев К.С., Кузнецова А.С. История, география и перспективы малой гидроэнергетики России	30
Кузнецова А.С. Оценка потенциала малых ГЭС для балансирования выработки СЭС в регионах России.....	52
Нигматулин Р.И. Мои директорские страсти: размышления о времени, науке и себе: путь академика Р.И. Нигматулина	65
Сушкова Е.Г., Афанасьев Д.Ф., Беспалова Л.А. Ландшафтно- экологический подход к картированию фитобентоса заливов Таманского полуострова	77
Чекарев К.В., Залиханов А.М. Подвесная парусная энергоустановка	92

Content

Andreenko T.I., Degtyarev K.S., Kiseleva S.V., Rafikova Yu.Yu. Energy potential of sludge in regions of Russia	4
Degtyarev K.S., Kuznetsova A.S. History, geography, and prospects of small-scaled hydropower in Russia	30
Kuznetsova A.S. Assessment of the potential of small hydroelectric power plants to balance the generation of solar power plants in the regions of Russia	52
Nigmatulin R.I. My Director's Passions: Reflections on Time, Science, and Self — The Path of Academician R.I. Nigmatulin.	65
Sushkova E.G., Afanasyev D.F., Bepalova L.A. Landscape-ecological approach to mapping phytobenthos of the Taman peninsula bays	77
Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Hanging sailing power plant.....	92

УДК 621.311.25

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-2-4-29

EDN: EAGTXO

Энергетический потенциал осадков сточных вод в регионах России

^{1,1} Андреевко Татьяна Ивановна^[0000-0001-8678-3568],
^{1,2} Дегтярев Кирилл Станиславович^[0000-0002-1738-6320],
^{1,3} Киселева Софья Валентиновна^[0000-0001-5836-8615],
^{1,4} Рафикова Юлия Юрьевна^[0000-0003-3204-9135]

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

E-mail: ¹ tanyandr00@mail.ru, ² kir1111@rambler.ru,
³ k_sophia_v@mail.ru, ⁴ ju.rafikova@mail.ru

Аннотация. Представленная работа посвящена теме утилизации отходов, образующихся в очистных сооружениях в виде осадков сточных вод (ОСВ). Приведена сформированная авторами методика оценки выхода биогаза, учитывающая биохимический состав осадка. Потенциальное производство электрической и тепловой энергии из биогаза оценивалось в предположении использования газопоршневой установки (мини-ТЭЦ на биогазе) или котельной. Оценки образования осадков сточных вод, биогаза и производства энергии проведены для всех субъектов Российской Федерации с учетом (для крупных по площади субъектов) дифференциации численности населения по их площади. Выделены лидеры по энергопотенциалу биомассы ОСВ, которые закономерно представлены максимально урбанизированными регионами страны. Приводится оценка доли крупных городов РФ в энергопотенциале ОСВ отдельных регионов. Рассматриваются возможные направления трансфера энергии от биогазовых станций и сопряженных с ними станций производства электро-теплогенерации.

Ключевые слова: осадки сточных вод, биоэнергетика, биогаз, производство энергии.

1 Введение

Урбанизация, рост городов и повышение уровня санитарии приводят к росту централизованных систем водоотведения в городских и сельских поселениях,

увеличению объема очистки бытовых сточных вод и соответственно к росту сопутствующего (побочного) продукта этой очистки – осадка сточных вод (ОСВ). В мире, по данным Global Water Intelligence, в 2017 году образовалось 83 млн тонн осадка сточных вод в сухом веществе (с.в.), прирост с 2012 года составил 10,7%. В России в этот же период ежегодно образовывалось более 2 млн тонн ОСВ. В последние годы оценки подтверждает указанный уровень ежегодного образования осадка сточных вод – более 80 млн. т. При этом величина ежегодного прироста сухого осадка составляет (в млн. т): в США – более 12, в Европейском Союзе – более 13, в КНР – порядка 8, в Японии и РФ порядка 2,5 млн т [1-3].

Согласно принятым подходам, ОСВ имеет два источника:

- сырой осадок, возникающий на этапе первичного отстаивания сточной жидкости, который состоит как из органических (в основном продукты жизнедеятельности человека), так и неорганических веществ. В качестве неорганической части преимущественно выступают мелкодисперсный песок и отходы производственных предприятий, поскольку некоторые виды промышленных осадков допускаются к поступлению в городскую канализационную сеть для обработки с муниципальным осадком. К ним относят осадки, образующиеся на предприятиях по производству продуктов питания, некоторых химических заводов и др.;

- избыточный ил (осадок первичных отстойников и избыточный активный ил), образующийся во время процессов биологической очистки сточных вод, который представляет собой сложный биоценоз простейших микроорганизмов, выводимый из системы аэротенк – вторичный отстойник. [4; 5].

Выделенные в процессе очистки сточных вод осадки относятся к трудно фильтруемым суспензиям коллоидного типа, содержащим соли тяжелых металлов, токсичные органические вещества в значительной концентрации, а также группы патогенных бактерий и простейших организмов, которые угрожают здоровью человека и могут вызвать серьёзные экологические проблемы. В то же время ОСВ содержит большое количество ценных питательных веществ, таких как азот, фосфор и органические вещества, которые можно использовать как удобрение. Такой сложный и неоднозначный состав ОСВ определяет необходимость комплексного подхода к проблеме утилизации осадка, а не только уменьшения его объема и обезвреживания (нейтрализации). В результате возможно осуществить не просто управление рисками, но и восстановление ресурсов, заключённых в этих значительных по объемам отходах. Именно поэтому обработка ОСВ является технологически сложным аспектом функционирования очистных сооружений: при доле осадков порядка 0,2-2,0% от общего потока сточных вод, поступающих на очистные сооружения, эксплуатационные расходы на обращение с осадками составляют от 20 до 60% от общей их величины [6-8].

В Российской Федерации осадки сточных вод, согласно законодательным актам по усовершенствованию методов управления отходами производства и потребления, являются ценным ресурсом, требующим повышения эффективности их вовлечения в хозяйственный оборот. К настоящему времени в системе стандартизации РФ имеется более десяти национальных стандартов, определяющих требования, применяемые к переработке ОСВ и приоритетные направления его использования для увеличения вовлечения продукции из ОСВ в полезный оборот [9-15]. В ИТС НДТ 10–2019 отмечается, что осадок сточных вод не классифицируется как отход производства и не подлежит удалению с территории очистного

сооружения. Согласно этому документу, обращение с ОСВ относится к технологическому процессу водоотведения и отходом считается только та его часть, которая непригодна для дальнейшего использования в виде сырья для производства продукции или энергии. В справочнике ИТС НДТ 10–2019 содержится описание известных в настоящее время универсальных подходов и методов, применимых при обращении с ОСВ, позволяющих довести иловый осадок до состояния, при котором он соответствует санитарным нормам (обезвоживание, анаэробная стабилизация жидких осадков с утилизацией биогаза, компостирование, термическая сушка, сжигание осадков). В качестве перспективных в ИТС НДТ указаны аэробная термофильная автотермическая стабилизация жидких осадков; вермикомпостирование; пиролизическая газификация; остеклование; получение жидкого топлива из осадка; суперкритическое жидкофазное окисление.

Современный энергоресурсный подход к обработке сточных вод предполагает процесс концентрирования и утилизации входящих в их состав химических веществ и элементов, имеющих энергетическую, удобрительную или иную ценность. Вместе с тем рынок такой продукции в России не сформирован и для преодоления высоких инвестиционных рисков необходимо стимулирование использования такой продукции из ОСВ [16].

В различных странах мира спектр методов и подходов к утилизации осадка сточных вод достаточно широк. Так, согласно [17], в настоящее время сжигание, захоронение в земле, санитарные свалки и производство строительных материалов являются наиболее широко используемыми техническими способами переработки ОСВ в Китае. Китай имеет огромную территорию, и поэтому методы обработки и утилизации остаточного ила в разных регионах имеют свою специфику. Например, компостирование является преобладающей технологией, применяемой в Южном Китае, в то время как сжигание — в Восточном Китае. Напротив, захоронение является широко применяемым подходом в остальных регионах. В наиболее экономически развитых странах Европейского Союза (Швейцария, Бельгия, Нидерланды, Германия, Дания) преобладающим методом обработки ОСВ является сжигание. При этом расширяется практика извлечения фосфора из золы. В США методы обращения с ОСВ разнообразны: по состоянию на 2019 г. 51% от объема осадков вносилось в почву, 22% размещалось на полигонах, 16% подвергалось сжиганию, остаточные отходы сбрасывались на рельеф [18]. В Японии в связи с ограниченностью территории выработаны отлаженные подходы к утилизации ОСВ в зависимости от типа населенных пунктов или районов. Так, согласно [18], в небольших муниципалитетах Японии проводится сбраживание осадков и использование полученного шлама в качестве сельскохозяйственных удобрений и грунта для посадок леса, а в крупных мегаполисах основной путь утилизации ОСВ – сжигание.

Если рассматривать осадки сточных вод как ресурс для получения энергии, важно отметить, что в целом водоснабжение, транспортировка и очистка сточных вод являются весьма энергоемкими процессами. В современных условиях стоимость потребляемой предприятиями водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) электрической и тепловой энергии, а также топлива составляет значительную часть себестоимости продукции. Общая электрическая мощность, необходимая для ВКХ города с умеренно выраженным рельефом с расходом воды 100 тыс.м³/сут, составляет (по ориентировочным расчетам) в среднем около

4000 кВт, в том числе на водоподготовку и подачу питьевой воды требуется средняя мощность 2300 кВт, на перекачку сточных вод – 600 кВт и очистку сточных вод – от 700 до 1900 кВт (приведенная производительность характерна для предприятий ВКХ многих российских областных центров) [19]. В связи с этим привлекательными становятся технологии производства тепловой и электрической энергии из осадков после очистки сточных вод. Органические загрязнения, поступающие в сточные воды, формируют их химический энергетический потенциал. При обычной для России загрязненности городских сточных вод 400 мг/л по химическому потреблению кислорода (ХПК) тепловая энергия массы загрязняющих веществ, содержащихся в ежесуточно образующихся 100 тыс.м³ сточных вод, составляет около 104 Гкал (по низшей теплоте сгорания), что эквивалентно потенциальной энергетической мощности около 5000 кВт. Таким образом, поток суммарной тепловой и химической энергии на входе на очистные сооружения составляет около 63 МВт, что более чем в 15 раз превышает общую электрическую мощность, потребляемую самой системой водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) [19].

ОСВ более чем на 50% состоит из органических веществ, что определяет возможность использования осадка в качестве возобновляемого энергетического ресурса для выработки тепла и электроэнергии. Полную утилизацию химической энергии осадка может обеспечить его сжигание с выработкой электроэнергии и утилизацией получаемого тепла. В России такой метод применяется, в частности на очистных сооружениях Санкт-Петербурга [20; 21]. При этом важным предварительным этапом схем со сжиганием осадка является термическая сушка, которая выступает потребителем вырабатываемого тепла. В результате сжигания органических составляющих масса осадка уменьшается на 93%, оставляя в остатке лишь 7% инертной золы.

Сжигание – эффективная, но дорогостоящая технология обработки осадка сточных вод. Она связана с необходимостью строительства и эксплуатацией специальных печей для сжигания (печи с псевдосжиженным слоем или многоподовые), с требованиями к очистке дымовых газов и утилизацией золы, которая часто содержит тяжелые металлы и другие загрязняющие вещества. Альтернативным, универсальным и перспективным с экономической точки зрения методом стабилизации ОСВ на крупных очистных сооружениях признано анаэробное сбраживание [11]. Доказано, что применение данной технологии может иметь положительный энергетический баланс, т.е. путем утилизации биогаза возможна выработка большего объема энергии, чем потрачено на анаэробную обработку осадков. Дальнейшее использование биогаза в когенерационных энергогенерирующих установках позволяет обеспечить до 80–100 % потребности в электроэнергии современных очистных сооружений [22; 23]. Технология позволяет значительно снизить экологическую нагрузку на окружающую среду и получить не только возобновляемый источник энергии (биогаз), но и ценное биоудобрение. Крупнейшими установками метанового сбраживания осадков сточных вод в России являются биогазовые станции и мини-ТЭЦ на биогазе МГУП «Мосводоканал» (г. Москва). В настоящее время на очистных сооружениях МГУП «Мосводоканал» эксплуатируются 44 метантенка общим объемом 280 тыс. м³, в том числе 24 метантенка на Курьяновских очистных сооружениях и 20 – на Люберец-

ких. На Курьяновской промплощадке работает мини-ТЭЦ на биогазе электрической мощностью 10 МВт, тепловой мощностью 6.9 Гкал/ч, с общим КПД 84.6%. На Люберецких очистных сооружениях мощность электростанции 12 МВт. Подобные технологические схемы обеспечивают существенное сокращение объема осадка и его полную стабилизацию (обеззараживание), что позволяет использовать его для рекультивации отработанных карьеров и полигонов ТКО. [24; 25].

Таким образом, задача утилизации осадков сточных вод является, безусловно, актуальной для многих стран мира, включая Россию. Идет поиск наиболее эффективных технологий утилизации с минимальным негативным эффектом на все элементы окружающей среды. При этом важно выявлять объемы образования осадков, что определяет необходимые площади иловых площадок для размещения образующегося осадка или – в случае выбора методов его дальнейшей переработки – мощности установок анаэробного сбраживания и мини-ТЭЦ. Для России оценка объемов образования ОСВ является актуальной задачей в связи со значительным разнообразием климатических и социально-экономических условий в отдельных субъектах, включая отсутствие в большинстве случаев очистных сооружений в сельских населенных пунктах, значительную неоднородность плотности населения, суровые климатические условия, требующие существенно больших затрат энергии на обработку осадков сточных вод и т.д. В связи с этим данная работа посвящена региональным оценкам объемов образования ОСВ и их технического энергетического потенциала. В качестве технического потенциала рассматривается прогнозируемое производство тепловой и электрической энергии на установках, соответствующих наилучшим доступным технологиям.

2 Материалы и методы

1. Методика оценки объемов образования ОСВ

Для оценки валового количества образующихся ежегодно осадков сточных вод принята норма образования ОСВ на одного жителя населенных пунктов, снабженных системой очистки канализационных стоков, равная 65 г/человека в сутки по сухому веществу [26; 11; 27; 28].

Источником данных о численности населения субъектов Российской Федерации служили данные Росстата [29]. Поскольку при расчетах предполагается, что очистными сооружениями, позволяющими в значительных количествах накапливать и проводить обработку осадков сточных вод, снабжены только городские поселения, то расчет объемов ОСВ проводился с учетом городского населения субъектов РФ. Отдельно были рассчитаны объемы ежегодного образования ОСВ в городах РФ с населением более 100 000 человек, как наиболее перспективные для использования ОСВ в энергетических целях.

Оценки выхода биогаза и метана при анаэробном сбраживании ОСВ были основаны на следующих подходах. Эффективность метанообразования из ОСВ определяется составом его беззольной части – содержанием белков, жиров и углеводов, характеризующихся различным выходом биогаза (смеси углекислого газа и метана) при анаэробном сбраживании. В связи с этим, для расчета выхода биогаза (и метана в его составе) были выявлены и в дальнейшем использованы в расчетах следующие характеристики осадков сточных вод:

- состав органической части ОСВ, т.е. содержание углеводов, жиров и белков;
- степень разложения каждого из этих компонентов при анаэробном сбраживании;
- удельный выход биогаза для углеводов, жиров и белков ОСВ;
- соотношения метана и углекислого газа, образующихся при анаэробном сбраживании каждого из компонентов органической части ОСВ.

Значения указанных показателей, являющихся результатами экспериментальных исследований, взяты из литературных источников и приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Усредненные характеристики основных компонентов осадков сточных вод для оценки выхода биогаза и метана при анаэробном сбраживании [30; 31]

Биохимические компоненты осадков сточных вод	Удельное содержание компонентов ОСВ, кг/кг (по сухому веществу)	Степень распада компонентов при анаэробном сбраживании, %	Удельный выход биогаза, м ³ /кг (по сухому веществу)	Содержание метана в биогазе, %
Углеводы	0.175	72.5	0.75...0.79	50
Жиры	0.25	80.0	1.25...1.42	68...72
Белки	0.25	47.0	0.70...0.74	70

Таким образом, на основе рассчитанного количества ОСВ определение выхода метана – V_{CH_4} проводили по формуле:

$$V_{CH_4} = \sum_{i=1}^3 M_{ОСВ} * C^i * K^i * C_{биогаз}^i * C_{CH_4}^i$$

где $M_{ОСВ}$ – масса осадков сточных вод, кг; C^i – удельное содержание i -го компонента ОСВ, кг/кг; K^i – степень распада i -го компонента ОСВ при анаэробном сбраживании, доли единицы; $C_{биогаз}^i$ – удельный выход биогаза, м³/кг i -го компонента ОСВ; $C_{CH_4}^i$ – содержание метана в биогазе для i -го компонента, доли единицы.

Предварительные расчеты на основе приведенных выше положений показывают, что выход биогаза из ОСВ варьируется от 360 до 520 л/кг ОСВ (по сухому весу). Эти оценки согласуются с результатами, приведенными в работах [32; 33; 2], согласно которым, выход биогаза составляет, соответственно, от 400 до 700 л/кг сухого органического вещества ОСВ (при содержании метана порядка 60%) , 200...500 л/кг (45...61% метана) и от 308,46 Nm³/т до 583,08 Nm³/т (при содержании метана от 50 до 75%) сухого вещества.

2. Оценка выработки энергии из биогаза ОСВ

Расчет выработки тепловой и электрической энергии из биогаза проводился в предположении, что для получения электрической энергии могут быть использованы газопоршневые установки (ГПУ), в которых реализуется когенерация с получением также тепловой энергии. Для получения только тепловой энергии оптимально использовать котельные на биогазе, которые характеризуются высоким КПД (порядка 90%). Тогда, согласно литературным данным, отражающим особенности работы ГПУ на биогазе/свалочном газе [34; 35] обоснованными являются следующие характеристики (таблица 2):

Таблица 2. Удельный выход электрической и тепловой энергии при работе ГПУ и котельных на свалочном газе/биогазе

Технология	Газопоршневые установки		Котельные
	Электрическая энергия, кВтч/м ³	Тепловая энергия, кВтч/м ³ / Гкал/1000 м ³	Тепловая энергия, кВтч/м ³ / Гкал/1000 м ³
Свалочный газ от полигонов ТКО (содержание метана 50%)	1.5	2.1 / 1.8	3.9 / 3.36
Биогаз от отходов животноводства (содержание метана 60%)	1.9	2.6 / 2.2	4.7 / 4.04
Биогаз от осадков сточных вод (содержание метана 65%)	2.1	2.9 / 2.5	5.09 / 4.38

При этом, учтены затраты электрической энергии на очистку от примесей, которые были приняты равными 0.0086 кВт*ч/м³ свалочного газа/биогаза для ГПУ [36]. Техничко-экономические характеристики газопоршневых установок приведены в таблице 3. Анализ технических характеристик электростанций на биогазе как за рубежом, так и в Российской Федерации показал, что выбранный тип энергоустановок для оценок технического потенциала вполне адекватен. Так, биогазовая электростанция Ворошнево (Курская область) имеет в своем составе 2 газотурбинные установки мощностью 1.067 МВт каждая фирмы Capstone Turbine Corporation (США). На биогазовой станции «Байцур» (Белгородская область) эксплуатируется газопоршневая энергоустановка компании Jenbacher (Австрия) мощностью 526 кВт. На Курьяновской промплощадке МГУП «Мосводоканал» действует мини-ТЭС на биогазе (производитель оборудования не уточняется, инвестор – австрийский концерн «EVN», подразделение ВТЕ Вассертехник ГМБХ.).

Таблица 3. Технические и экономические характеристики ГПУ, работающих на свалочном газе/биогазе

Технология	Газопоршневые установки
Электрический КПД, %	25...45 (35)
Выбросы NOx, г/кВтч, gnox	1
Выбросы CO ₂ , г/кВтч, gco2	415...500
Капитальные затраты, долл./кВт (в 5-летней перспективе), Ccap	300...1300
Расходы на обслуживание, долл./кВтч, Coper	0.007...0.015

3 Результаты и обсуждение

Представленный выше алгоритм расчета и статистические данные с детализацией до субъектов Российской Федерации и городов в их составе с населением более 100 000 человек были использованы для получения оценок объемов метана

в составе биогаза, которые потенциально можно получить из ежегодно образующихся осадков сточных вод (Таблица 4).

При оценках крупные по площади регионы России, при этом имеющие малую плотность населения, весьма неоднородно распределенного по территории (Красноярский край, Республика Саха (Якутия), Иркутская область, Хабаровский край) были по границам муниципалитетов разделены на части (3 – для первых двух субъектов, 2 – для Иркутской области и Хабаровского края). Это деление отражено как в таблице 4, так и на карте (рис. 3), где представлена доля крупных городов (более 100 000 человек) в техническом энергетическом потенциале ОСВ.

Из методики оценки технического потенциала очевидно, что абсолютные объемы биогаза из ОСВ и технический потенциал линейно определяются численностью городского населения в регионе. Качественная картина распределения субъектов РФ по величине технического потенциала ОСВ представлена на рис. 1, который показывает, что наибольшим энергопотенциалом обладают максимально урбанизированные субъекты РФ: Москва и Московская область (472 млн. кВтч электроэнергии или 562 тыс. Гкал/год тепла), Санкт-Петербург и Ленинградская область (166 млн. кВтч или 198 тыс. Гкал/год).

Таблица 4. Валовый потенциал образования биогаза при метановом сбраживании осадков сточных вод в городских поселениях субъектов РФ. Потенциал производства тепловой и электрической энергии из биогаза ОСВ.

№	Код субъекта РФ	Субъект РФ, ОЭС, ТИЭС	Количество биогаза из ОСВ по всем городам, млн. м ³ /год	Количество биогаза из ОСВ по городам с населением более 100 000 чел., млн. м ³ /год	Технический потенциал производства электроэнергии на ГПУ из свалочного газа ТКО, млн.кВтч/год	Технический потенциал производства тепловой энергии на ГПУ из биогаза от осадков сточных вод, тыс.Гкал/год
1	22	Алтайский край	13,8	10,6	74	36
2	28	Амурская область	5,7	2,5	30	15
3	29	Архангельская область	8,3	5,8	48	22
4	30	Астраханская область	6,8	5,7	37	18
5	31	Белгородская область	11,1	6,8	59	29
6	32	Брянская область	8,9	4,4	47	23
7	33	Владимирская область	11,5	6,5	59	30
8	34	Волгоградская область	21,3	15,8	108	55
9	35	Вологодская область	9,1	6,8	47	23
10	36	Воронежская область	17,4	11,5	88	45
11	79	Еврейская АО	1,2	0,0	6	3
12	75	Забайкальский край	7,6	3,9	41	20
13	37	Ивановская область	8,4	4,4	45	22
14	38	Иркутская область	20,2	11,7	102	52
15	38	Иркутская область. Север.	0,4	0,0	2	1
16	38	Иркутская область. Юг	19,9	11,7	100	51
17	7	Кабардино-Балкарская Республика	5,2	2,6	25	13
18	39	Калининградская область	8,7	5,5	45	23
19	40	Калужская область	8,9	5,0	43	23

Журнал «Окружающая среда и энерговедение» (ОСЭ) №2(2025)

№	Код субъекта РФ	Субъект РФ, ОЭС, ТИЭС	Количество биогаза из ОСВ по всем городам, млн. м ³ /год	Количество биогаза из ОСВ по городам с населением более 100 000 чел., млн. м ³ /год	Технический потенциал производства электроэнергии на ГПУ из свалочного газа ТКО, млн.кВтч/год	Технический потенциал производства тепловой энергии на ГПУ из биогаза от осадков сточных вод, тыс.Гкал/год
20	41	Камчатский край	2,5	2,0	14	6
21	9	Карачаево-Черкесская Республика	2,1	1,4	11	6
22	42	Кемеровская область	24,7	14,1	128	64
23	43	Кировская область	9,9	5,8	55	26
24	44	Костромская область	4,7	3,1	26	12
25	23	Краснодарский край	36,6	20,7	178	95
26	24	Красноярский край	25,0	15,4	128	65
27	24	Красноярский край. Север	2,2	2,0	11	6
28	24	Красноярский край. Центр	1,2	0,0	6	3
29	24	Красноярский край. Юг	19,9	13,3	111	51
30	45	Курганская область	5,4	3,4	46	14
31	46	Курская область	8,1	4,9	42	21
32	47	Ленинградская область и Санкт-Петербург	76,7	59,4	375	198
33	48	Липецкая область	7,9	5,5	41	20
34	49	Магаданская область	1,4	0,0	8	4
35	50	Московская область и Москва	217,5	178,8	1056	562
36	51	Мурманская область	6,8	3,1	38	18
37	83	Ненецкий АО	0,3	0,0	2	1
38	52	Нижегородская область	27,4	17,2	143	71
39	53	Новгородская область	4,7	2,5	24	12
40	54	Новосибирская область	24,6	19,0	124	63
41	55	Омская область	15,0	12,4	78	39

№	Код субъекта РФ	Субъект РФ, ОЭС, ТИЭС	Количество биогаза из ОСВ по всем городам, млн. м ³ /год	Количество биогаза из ОСВ по городам с населением более 100 000 чел., млн. м ³ /год	Технический потенциал производства электроэнергии на ГПУ из свалочного газа ТКО, млн.кВтч/год	Технический потенциал производства тепловой энергии на ГПУ из биогаза от осадков сточных вод, тыс.Гкал/год
42	56	Оренбургская область	12,2	8,8	67	32
43	57	Орловская область	5,2	3,3	27	13
44	58	Пензенская область	9,6	5,6	50	25
45	59	Пермский край	21,1	13,0	110	54
46	25	Приморский край	15,9	11,2	82	41
47	60	Псковская область	4,7	2,3	25	12
48	1	Республика Адыгея	2,7	1,5	12	7
49	4	Республика Алтай	0,7	0,0	4	2
50	2	Республика Башкортостан	28,0	19,9	141	72
51	3	Республика Бурятия	6,4	4,8	33	16
52	5	Республика Дагестан	15,9	11,2	80	41
53	6	Республика Ингушетия	3,1	1,4	16	8
54	8	Республика Калмыкия	1,4	1,1	7	4
55	10	Республика Карелия	4,7	3,1	28	12
56	11	Республика Коми	6,3	2,7	36	16
57	91	Республика Крым и Севастополь	16,3	12,3	81	42
58	12	Республика Марий Эл	5,1	3,1	26	13
59	13	Республика Мордовия	5,5	3,5	28	14
60	14	Республика Саха (Якутия)	7,4	3,8	38	19
61	14	Республика Саха (Якутия). Север	0,3	0,0	1	1
62	14	Республика Саха (Якутия). Центр	5,3	3,8	28	14
63	14	Республика Саха (Якутия). Юг	1,7	0,0	8	4

Журнал «Окружающая среда и энерговедение» (ОСЭ) №2(2025)

№	Код субъекта РФ	Субъект РФ, ОЭС, ТИЭС	Количество биогаза из ОСВ по всем городам, млн. м ³ /год	Количество биогаза из ОСВ по городам с населением более 100 000 чел., млн. м ³ /год	Технический потенциал производства электроэнергии на ГПУ из свалочного газа ТКО, млн.кВтч/год	Технический потенциал производства тепловой энергии на ГПУ из биогаза от осадков сточных вод, тыс.Гкал/год
64	15	Республика Северная Осетия-Алания	4,8	3,3	25	12
65	16	Республика Татарстан	33,9	24,1	169	87
66	17	Республика Тыва	2,0	1,4	10	5
67	19	Республика Хакасия	4,0	2,1	21	10
68	61	Ростовская область	31,4	23,9	161	81
69	62	Рязанская область	8,6	5,8	45	22
70	63	Самарская область	27,8	21,9	142	72
71	64	Саратовская область	20,5	13,6	102	53
72	65	Сахалинская область	4,2	2,2	23	11
73	66	Свердловская область	40,3	23,3	242	104
74	67	Смоленская область	7,1	3,5	37	18
75	26	Ставропольский край	19,4	10,6	93	50
76	68	Тамбовская область	6,5	3,2	34	17
77	69	Тверская область	10,3	4,7	54	27
78	70	Томская область	8,4	7,5	43	22
79	71	Тульская область	12,1	6,4	61	31
80	72	Тюменская область	11,9	9,2	87	31
81	18	Удмуртская Республика	10,5	7,1	56	27
82	73	Ульяновская область	10,1	8,1	52	26
83	27	Хабаровский край	11,9	9,4	60	31
84	27	Хабаровский край. Север	0,0	0,0	0	0
85	27	Хабаровский край. Юг	11,9	9,4	60	31

№	Код субъекта РФ	Субъект РФ, ОЭС, ТИЭС	Количество биогаза из ОСВ по всем городам, млн. м ³ /год	Количество биогаза из ОСВ по городам с населением более 100 000 чел., млн. м ³ /год	Технический потенциал производства электроэнергии на ГПУ из свалочного газа ТКО, млн.кВтч/год	Технический потенциал производства тепловой энергии на ГПУ из биогаза от осадков сточных вод, тыс.Гкал/год
86	86	Ханты-Мансийский Аок-Югра	17,4	10,1	95	45
87	45	Челябинская область	31,2	22,6	194	81
88	20	Чеченская Республика	6,4	3,6	32	16
89	21	Чувашская Республика	8,4	6,9	43	22
90	87	Чукотский АОк	0,4	0,0	2	1
91	89	Ямало-Ненецкий АОк	4,8	2,5	31	12
92	76	Ярославская область	10,8	8,5	57	28

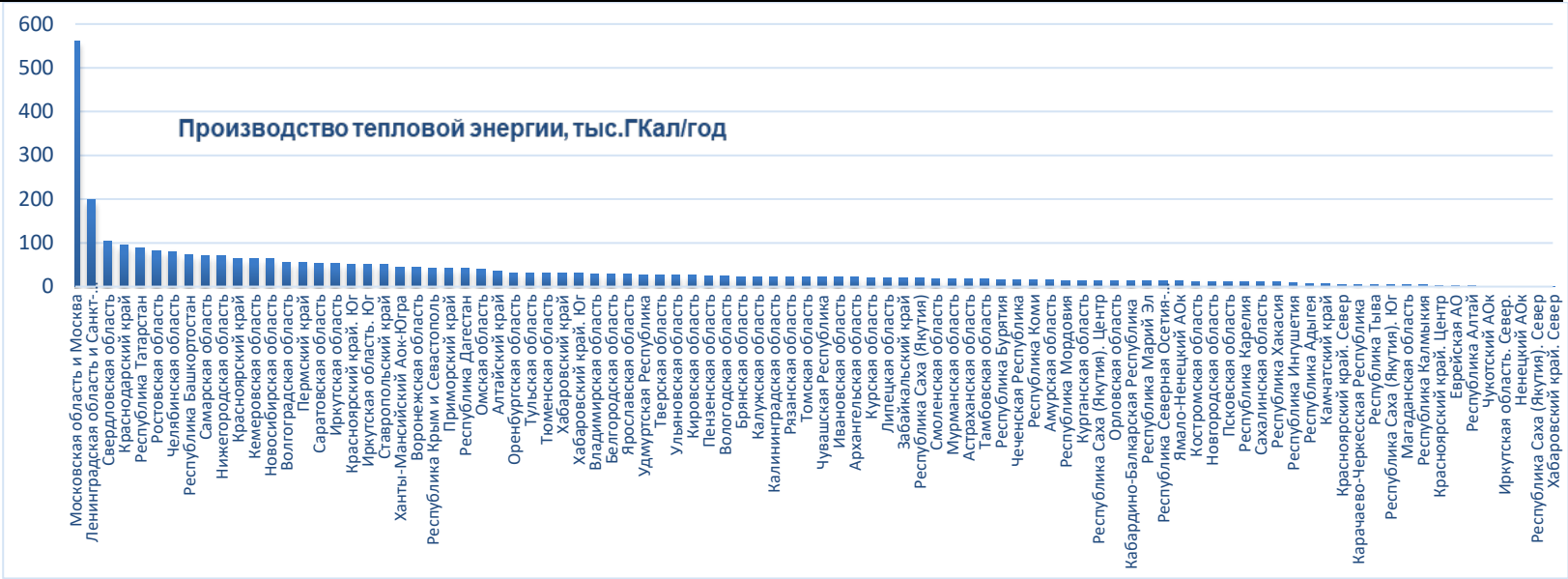


Рис. 1. Распределение субъектов РФ по техническому потенциалу производства тепловой энергии из биогаза ОСВ в котельных, тыс.Гкал/год

Из диаграммы распределения субъектов РФ по градациям в соответствии с величиной энергопотенциала (Рисунок 2) видно, что диапазон вариаций величины энергопотенциала велик (даже вне учета субъектов, включающих три крупнейших мегаполиса страны – Москву, Санкт-Петербург и Екатеринбург): минимальная величина (0-19 Гкал/год) достигается в 40 субъектах, в то время, как максимальная величина из оставшегося пула (80-100 Гкал/год) может быть получена из осадка сточных вод в 4 субъектах (Челябинская, Ростовская область, Краснодарский край, Республика Татарстан). Для характеристики взят потенциал производства тепловой энергии при сжигании биогаза из ОСВ в котельных.

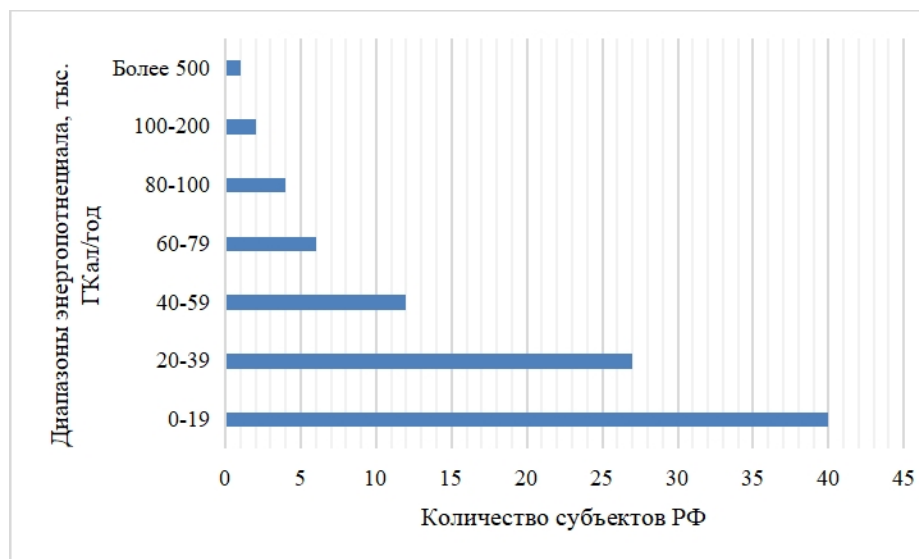


Рис. 2. Диаграмма распределения субъектов РФ по градациям в соответствии с величиной энергопотенциала

Роль крупных городов (с населением более 100 000 человек) в формировании технического энергопотенциала ОСВ представлена на рис. 3. В большей части субъектов РФ доля крупных городов составляет 51–75%. В ряде субъектов энергопотенциал формируется 1-2 крупными городами: Норильск - Север Красноярского края; Якутск – Центр Республики Саха (Якутия); Хабаровск, Комсомольск-на-Амуре (Хабаровский край); Петропавловск-Камчатский (Камчатский край); Улан-Удэ (Республика Бурятия).

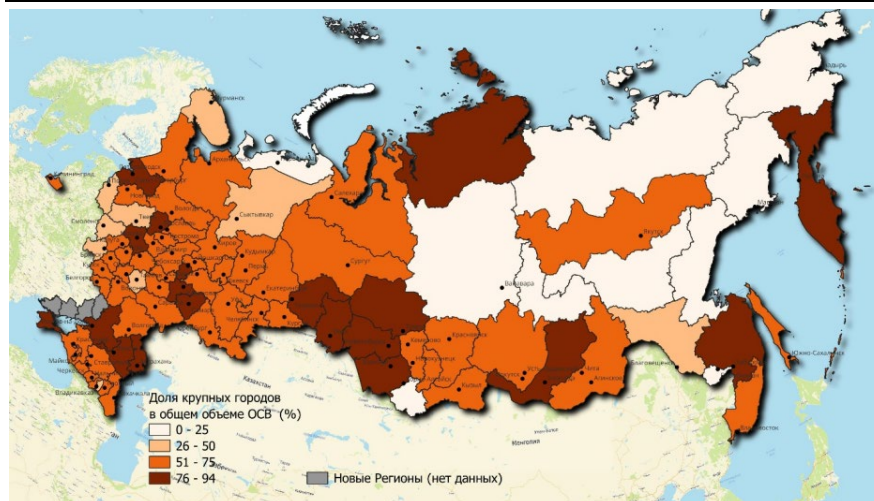


Рис. 3. Доля крупных городов (население свыше 100 000 человек) в суммарном объеме осадков сточных вод в субъектах РФ. Карта составлена инженером НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ Шакуном В.П.

Сравнение производства тепловой энергии в городах и поселках городского типа субъектов РФ (данные Росстата за 2023 г.) с энергетическим потенциалом производства тепла из биогаза ОСВ показало, что потенциальная степень замещения производства тепла за счет ОСВ весьма незначительна: по России в целом она составляет 0,4%, по большинству регионов 0,3-0,4%. В малонаселенных северных регионах (Мурманская, Магаданская области) она снижается ниже 0,2. Максимальная доля может быть достигнута в регионах юга России с более низкими потребностями (и, следовательно, производством) тепловой энергии и со значительным городским населением: в Республике Адыгея – 1,31%, в Республике Крым – 1,72%, в Краснодарском крае – 0,94%, в Ростовской области – 0,81%. Однако, нельзя говорить о значительной роли ОСВ в замещении теплоснабжения и энергопотребления в целом.

Результативным может оказаться использование произведенной энергии на собственные нужды как биогазовых установок, так и водоочистных сооружений. На территории РФ биогазовые установки (БГУ), работающие в мезофильном режиме (температура субстрата в БГУ находится в диапазоне от 25 до 40°C) требуют значительного количества энергии на собственные нужды. Очевидно, что величина этой энергии зависит от климатических условий местности. Масштабное исследование практических результатов работы статистически значимого количества биогазовых установок в Германии (переработка отходов животноводства) [37], позволяют получить некоторые оценки затрат тепловой энергии на поддержание работы БГУ в оптимальном режиме. Было показано, что объемы вырабатываемой из биогаза тепловой энергии, направляемые внешним потребителям, широко варьируются (от 1,5 до 67%) (рис. 4). Немногим более 20% всех

установок утилизируют менее 10% потенциально располагаемого тепла, направляя остатки его на обеспечение внешних потребителей. Значения тепловой энергии, требуемой на обеспечение технологического процесса (тепловая энергия на собственные нужды), определенные в этом исследовании на примере 10 установок, находились в пределах от 5,5 до 21,5%. 25% установок, напротив, достигают показателя теоретического использования, который составляет уже свыше 30%.

Практический опыт немецких БГУ, работающих на отходах животноводства, показал также, что имеющийся потенциал производства тепловой энергии практически не используется в полной мере, и большие объемы получаемого тепла просто отводятся в атмосферу.

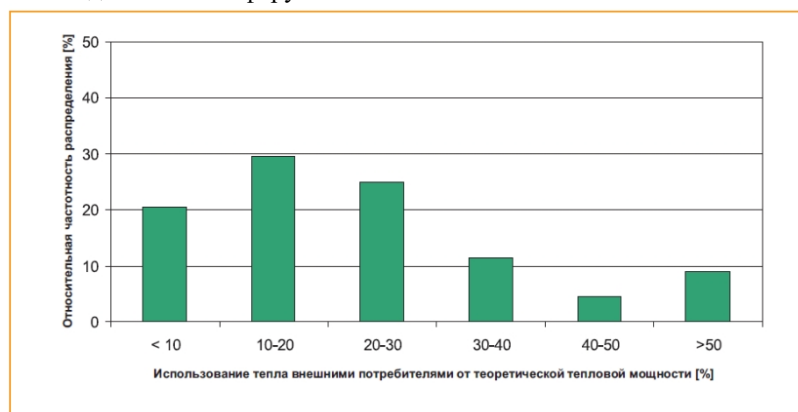


Рис. 4. Распределение использования тепла внешними потребителями как доля от суммарной тепловой мощности (теоретической выработки тепла на БГУ) [37]

Величины потребления электроэнергии на собственные нужды, согласно [37], лежат в диапазоне от 5,0 до 20,6% от объема выработанной электроэнергии, среднее значение составляет 7,9% (Рис. 5).

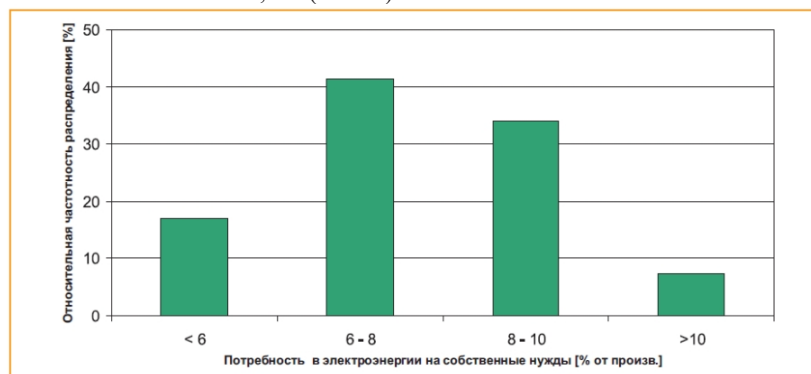


Рис. 5. Распределение биогазовых установок по потребности в электроэнергии на собственные нужды [37]

Таким образом, при уточнении потенциала производства тепловой и электрической энергии из ОСВ путем метанового брожения с получением биогаза как промежуточного энергоносителя следует учитывать потребление энергии на собственные нужды БГУ. Основой расчетов должны стать теоретические оценки или обобщение практического опыта эксплуатации БГУ. Типовые показатели затрат на собственные нужды приведены в таблице 5 на основе [37].

Таблица 5. Общие характеристики биогазовых установок, использующих в качестве сырья отходы животноводства. *Источник:* [37]

Характеристики	Единицы измерения	Средние значения	Минимальное	Максимальное
Полезное использование электрической мощности	%	85	52	98
Полезное использование тепловой мощности	%	23	2	67
Потребление электроэнергии на собственные нужды	% от производства	7,9	5,0	20,6
Потребление тепловой энергии на собственные нужды	% от производства	11,5	5,5	21,5

На очистных сооружениях энергопотребление на очистку одного кубического метра сточных вод варьируется в широких пределах в зависимости от типа очистных сооружений, содержания стоков и степени их очистки. Согласно данным сайта WaterandWastewater.com, в среднем это потребление может составлять от 0,4 до 1,0 кВтч/м³ сточных вод. При этом расход энергии зависит от размера очистных сооружений: крупные предприятия, обслуживающие более 100 000 человек, обычно потребляют 0,3–0,8 кВтч/м³ стоков; средние, обслуживающие от 10 000 до 100 000 человек, расходуют около 0,4–1,0 кВтч/м³ и малые предприятия, собирающие сточные воды от менее, чем 10 000 жителей, обычно потребляют от 0,5 до 1,5 кВтч/м³ [38]. Эти сведения и результаты наших расчётов позволяют определить возможное покрытие энергетических потребностей очистных сооружений на очистку стоков энергией биогаза, полученного анаэробным сбраживанием ОСВ. Согласно нашим расчётам и известным экспериментальным данным, полагаем удельное образование биогаза на очистных сооружениях равным 500 м³ из 1 т сухого вещества ОСВ (с.в. ОСВ), а выработку электроэнергии из биогаза при использовании газопоршневой установки равной 2,1 кВтч из кубического метра биогаза [34; 35]. Тогда удельная энергия ОСВ составляет 1050 кВтч на тонну с.в. ОСВ и 68,25 Втч на 0,065 т с.в. ОСВ (суточное образование ОСВ на одного человека). Предположение о том, что в городе на одного человека приходится 0,2 м³ сточных вод и 0,065 т с.в. ОСВ, позволяет заключить, что из 1 м³ сточных вод можно получить 341,25 Втч электроэнергии. Малые предприятия по очистке сточных вод потребляют в среднем 1 кВтч на обработку 1 м³ стоков и при обслуживании населения в 10 000 человек (учитывая суточный объем стоков от одного человека 0,2 м³) тратят в сутки 2000 кВтч. Следовательно, за счёт биогаза на малых предприятиях можно покрыть 34% расхода электро-

энергии на очистку сточной воды. Аналогичные расчёты показывают, что электроэнергия из биогаза покрывает 49% затрат электроэнергии на средних предприятиях и 62% - на крупных.

Эти оценки показывают, что производство биогаза на очистных сооружениях и преобразование его энергии в электрическую позволяют покрыть значительную часть энергопотребления предприятий. Вследствие крайней важности снижения расхода энергии на очистных сооружениях, исследовательские работы по оптимизации процесса анаэробного сбраживания осадка сточных вод продолжаются как в области увеличения скорости и эффективности анаэробного разложения органических веществ, включая предварительную обработку субстрата, оптимизации условий сбраживания, так и с целью технического усовершенствования различных типов реакторов [39; 40]. Исследования возможностей энергогенерации, сопутствующей очистке сточных вод, позволяют надеяться, что в недалекой перспективе осадки сточных вод будут широко использоваться в качестве энергетического сырья, и в результате этого очистные сооружения смогут сменить статус энергопотребителя на статус производителя энергии [41].

4 Заключение

Отходы в виде твердого органического вещества (биомассы) формируются в нескольких отраслях промышленности и хозяйства. Очистные сооружения являются источниками значительных объемов таких отходов. При этом по мере накопления все более значимой становится задача утилизации ОСВ, для чего в мире применяется широкий ряд методов, в том числе компостирование, внесение в почвы в качестве удобрений, введение в виде наполнителей в строительные материалы и т.д. Использование осадков для получения энергии рассматривается как один из перспективных методов утилизации. Важно при этом оценить, каков выход энергии от этого источника и какие потребности могут быть покрыты вырабатываемой тепловой и электрической энергией.

На основе подходов, изложенных в научной литературе, авторами предложена методика расчета объемов биогаза и метана в его составе, образующегося при метаногенезе ОСВ. Методика учитывает биохимический состав ОСВ, степень разложения и удельный выход биогаза при анаэробном сбраживании отдельных компонентов.

Для оценки выхода тепловой и электрической энергии из биогаза от ОСВ были использованы технические характеристики газопоршневых электростанций и газовых котельных. Разработанные методические подходы, нормы образования ОСВ и статистические данные о численности городского населения позволили провести оценки потенциального производства тепловой и электрической энергии в регионах РФ с детализацией до субъектов и их частей – для Красноярского и Хабаровского краев, Республики Саха, Иркутской области.

Результаты показали, что наибольшим ежегодным объемом образования ОСВ и выходом биогаза характеризуются максимально урбанизированные субъекты РФ. Соответственно энергетический потенциал в этих регионах значительно превосходит остальные субъекты России: Москва и Московская область (562 тыс.

Гкал/год), Санкт-Петербург и Ленинградская область (198 тыс. Гкал/год). Ближайшие регионы (Свердловская область, Краснодарский край, Республика Татарстан и др.) имеют более чем в 5 раз меньшие объемы образования ОСВ, потенциального производства биогаза и выработки тепловой и электрической энергии. В большей части субъектов РФ доля крупных городов с населением более 100 000 человек составляет 51–75%.

В то же время доля потенциальной тепловой энергии из ОСВ в общей выработке тепла для городских поселений регионов России составляет весьма небольшую величину; в среднем по РФ она составляет 0,4%. При этом только наиболее благоприятные условия (большая численность городского населения и мягкие климатические условия) дают рост этой доли до 1,31% (Республика Адыгея), 1,72% (Республика Крым) и т.д. В связи с этим важно рассмотреть использование получаемой тепловой и электрической энергии как источник энергообеспечения как самих биогазовых установок, так и станций водоочистки. Согласно проведенным оценкам, производство электроэнергии из осадков сточных вод может покрывать 34% от потребностей малых, 49% - средних и до 62% крупных очистных сооружений. Таким образом, могут быть сформированы замкнутые по энергии кластеры, решающие задачу как водоочистки, так и утилизации ОСВ, сопровождающейся производством полезного продукта (энергии) и значительным сокращением объемов вторичных отходов.

Благодарность. Исследование выполнено в рамках Госзадания №121051400082-4 «Географические основы устойчивого развития энергетических систем с использованием возобновляемых источников энергии».

Литература

1. Семашко Н. В будущее без осадка. "Business Guide "Экология"". Приложение №40 от 28.09.2018, стр. 7. [Электронный ресурс] URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3745197>. Дата обращения: 04.07.2025
2. Kiselev A., Magaril E., Magaril R., Panepinto D., Ravina M. and Zanetti M. Ch.. Towards Circular Economy: Evaluation of Sewage Sludge Biogas Solutions. Resources 2019, 8, 91
3. Wei L., Zhu F., Li Q., Xue C., Xia X., Yu H., Zhao Q., Jiang J. Development, current state and future trends on exploratory data and CO₂ - equivalent emissions analysis. Environment International, 144, 2020, 106093
4. Волосникова Г.А., Чернобровкина О.Е. Поиск путей оптимизации технологического процесса обработки осадка очистных сооружений канализации МУП г. Хабаровска «Водоканал» // Инновации и инвестиции. 2022. №5. С.187-194
5. Данилович Д.А., Ванюшина А.Я. Анаэробное сбраживание – ключевая технология обработки осадков городских сточных вод. Ч.1. // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 10. С. 58–67
6. Благоразумова М.А. Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод. Новокузнецк. 2010. С.138.
7. An Introduction to Sewage Sludge and Sludge Treatment. 15.08.2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cambi.com/blog/sewage-sludge-and-sludge-treatment>. Дата обращения: 04.07.2025

8. Biological Wastewater Treatment Series, Volume 6: Sludge Treatment and Disposal. Editors: Andreoli C.V., Von Sperling M., Fernandes F. London: IWA Publishing. 2007
9. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 N7- ФЗ
10. Федеральный закон «О водоснабжении и водоотведении» от 07.12.2011 N416- ФЗ
11. ИТС НДТ 10–2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений городских округов. – М.: Бюро НДТ, 2019. – 434 с
12. Сан. ПиН 2.1.7. 573-96 Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения. М.: Минздрав России. 1997.
13. ГОСТ Р 59748–2021. Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования. М.: Российский институт стандартизации. 2021. 24 с.
14. ГОСТ Р 54535-2011 Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при размещении и использовании на полигонах. М.: Стандартинформ, 2012. 7 с.
15. ГОСТ Р 54534–2011 Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель. М.: Стандартинформ, 2012. 7 с.
16. Шкаредо В.А., Эпштейн А.Д., Самбурский Г.А. Вовлечение продуктов, полученных с использованием ОСВ, в хозяйственный оборот: что для этого нужно // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2023. №4. С.4-6.
17. Liangliang Wei, Fengyi Zhu, Qiaoyang Li, Chonghua Xue, Xinhui Xia, Hang Yu, Qingliang Zhao, Junqiu Jiang, Shunwen Bai. Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO2-equivalent emissions analysis // Environment International, Vol. 144, 2020, 106093
18. Рублёвская О.Н., Лысова Т.И., Саркисов Л.Ф. Нормативно-правовые тенденции и технологические подходы к утилизации осадков сточных вод: международная практика // НДТ. 2023. № 2, С.4-10.
19. Данилович Д.А. Энергосбережение и альтернативная энергетика на очистных сооружениях канализации // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. №1. С. 9-20. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vstnews.ru/ru/archives-all/2011/2011-1/1010-energoberezenije-i-alternativnaja-energetika>. Дата обращения: 04.07.2025
20. Кармазинов Ф.В., Васильев Б.В., Григорьева Ж.Л. Сжигание осадков сточных вод – решение проблемы их утилизации // Водоснабжение и сантехника. 2008. № 9
21. Клоков А.И., Котович А.И., Джамбулов Р.Л., Тюкаев Е.М. Оценка соответствия технологии сжигания осадка сточных вод на ЗСО ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» требованиям НДТ // НДТ. 2022. № 2. С.19-24. [Электронный ресурс]. URL: <https://xn---gtbnrdgyt.xn--plai/wp-content/uploads/flipbook/139/book.html#p=21>. Дата обращения: 04.07.2025
22. Трунов П.В., Лунин С.В., Шевченко А.А. Современные энергосберегающие технологии обработки осадков // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. 2010. № 11. С. 38–41
23. Данилович Д.А., Ванюшина А.Я. Анаэробное сбраживание – ключевая технология обработки осадков городских сточных вод. Ч. 2 // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 11. С. 50–56.
24. Материалы портала по тригенерации, когенерации и мини-ТЭЦ. Пахомов А.Н. Мини-ТЭС на биогазе: опыт МГУП «Мосводоканал». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/1051-Mini-TES-na%20biogaze-opyt-MGUP-Mosvodokana>
25. Васильева А.В., Харламова М.Д. Современные способы переработки осадков сточных вод и перспективы их использования в России // Sciences of Europe. 2016. № 9 (9). С. 27–34.

26. СП 32.13330.2018 Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85. – М.: Стандартинформ, 2019. 76 с.
27. The international water association publishing. Sludge Production. [Электронный ресурс]. URL: https://www.iwapublishing-com.translate.google.com/news/sludge-production?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=rq#::~:~:text=Specific%20sludge%20production%20in%20wastewater. Дата обращения: 04.07.2025
28. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям). Под ред. Безруких П.П. М.: «ИАЦ Энергия», 2007. 272 с.
29. Официальный сайт Росстата. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2023 года. Статистический бюллетень. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204>. Дата обращения 06.06.2024
30. Кузнецов А.Е., Градова Н.Б., Лушников С.В. и др. «Прикладная экобиотехнология» Учебник для высшей школы, том 1, 3-е издание (электронное). М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015. 490 с.;
31. Корзникова М.В., Блохин А.Ю., Козлов Ю.П. Получение и использование биогаза в Российской Федерации при переработке отходов сельского хозяйства // Вестник РУДН, серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». 2008. №3. С.17-22.
32. Мирошниченко И.В., Снеговой Е.В. Повышение эффективности переработки осадков сточных вод в биогаз // Биология в сельском хозяйстве. 2019. №1 (22). [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-pererabotki-osadkov-stochnyh-vod-v-biogaz/viewer>. Дата обращения: 01.05.2024
33. Удинцев Д.Н., Шведов Г.В., Королёва Е.С., Мерзликин А.Б. Оценка потенциала выработки электроэнергии из отходов жизнедеятельности человека в системах электрообеспечения городов // ЭлектроЭнергия. Передача и распределение. 2020. №3 (60). [Электронный ресурс]. URL: <https://eepir.ru/release/jelektroenergija-peredacha-i-raspre-del-6/>. Дата обращения: 01.05.2024
34. Агарков Д.А., Бредихин С.И., Киселева С.В., Матвеев Д.В., Самойлов А.В., Тарасенко А.Б., Федотов Ю.С., Ципис Е.В. Перспективы применения твердооксидных топливных элементов для утилизации свалочного газа полигонов твердых коммунальных отходов России // Теплоэнергетика, 2023, № 1, с. 87–94
35. Xiaoli Hao, Hongxing Yang, Guoqiang Zhang. Trigenation: A new way for landfill gas utilization and its feasibility in Hong Kong// Energy Policy, 36 (2008), pp. 3662– 3673
36. John N. Kuhn, Anthony C. Elwell, Nada H. Elsayed, Babu Joseph Requirements, techniques, and costs for contaminant removal from landfill gas // Waste Management 63 (2017) 246–256
37. Биогаз на основе возобновляемого сырья. Сравнительный анализ 61 установки по производству биогаза в Германии. Институт аграрных технологий и биосистемной техники. Бундесаллее 50 • 38116 Брауншвайг • Германия. 2010.
38. How Much Electricity Does A Wastewater Treatment Plant Use. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.waterandwastewater.com/how-much-electricity-does-a-wastewater-treatment-plant-use/#::~:~:text=Use%20approxi-mately%200.4%2D1.0%20kWh%20per%20cubic%20meter>. Дата обращения: 04.07.2025
39. Карасева Ю.В., Трахунова И.А. Обзор технологий и методов интенсификации процессов анаэробного сбраживания. Труды Академии. 2010. №3. С.109–127

40. Паршикова М.В., Касаткин В.В., Касаткина Н.Ю., Литвинюк А.А. Результаты исследований процесса анаэробного сбраживания отходов животноводства и осадков сточных вод с применением биогазовой установки. *АгроЭкоИнженерия*, 2023, №2(115), с.140-158
41. Кофман В.Я. Удаление азота из сточных вод. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vo-da.ru/articles/udalenie-azota/ochistka-osnovnogo-potoka>. Дата обращения: 04.07.2025

References

1. Semashko N. V budushchee bez osadka. "Business Guide "Ekologiya"". Prilozhenie №40 ot 28.09.2018, str. 7. [Elektronnyj resurs] URL: <https://www.kommer-sant.ru/doc/3745197>. Data obrashcheniya: 04.07.2025
2. Kiselev A., Magaril E., Magaril R., Panepinto D., Ravina M. and Zanetti M. Ch. Towards Circular Economy: Evaluation of Sewage Sludge Biogas Solutions. *Resources* 2019, 8, 91
3. Wei L., Zhu F., Li Q., Xue C., Xia X., Yu H., Zhao Q., Jiang J. Development, current state and future trends on exploratory data and CO₂ - equivalent emissions analysis//*Environment International* 144 (2020) 106093
4. Volosnikova G.A., Chernobrovkina O.E. Poisk putej optimizacii tekhnologicheskogo processa obrabotki osadka ochistnyh sooruzhenij kanalizacii MUP g. Habarovska «Vodokanal»//*Innovacii i investicii*. 2022. №5. S.187 – 194
5. Danilovich D.A., Vanyushina A.Ya. Anaerobnoe sbrashivanie – klyuchevaya tekhnologiya obrabotki osadkov gorodskih stochnyh vod. Ch.1. // *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2013. № 10. S. 58–67
6. Blagorazumova M.A. Obrabotka i obezvozhivanie osadkov gorodskih stochnyh vod. *Novokuzneck*. 2010. S.138.
7. An Introduction to Sewage Sludge and Sludge Treatment. 15.08.2021. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.cambi.com/blog/sewage-sludge-and-sludge-treatment>. Data obrashcheniya: 04.07.2025
8. Biological Wastewater Treatment Series, Volume 6: Sludge Treatment and Disposal. Editors: Andreoli C.V., Von Sperling M., Fernandes F. London: IWA Publishing. 2007
9. Federal'nyj zakon «Ob ohrane okruzhayushchej sredy» ot 10.01.2002 N7- FZ
10. Federal'nyj zakon «O vodosnabzhenii i vodootvedenii» ot 07.12.2011 N416- FZ
11. ITS NDT 10–2019. Ochistka stochnyh vod s ispol'zovaniem centralizovannyh sistem vodootvedeniya poselenij gorodskih okrugov. – M.: Byuro NDT, 2019. – 434 s
12. San. PiN 2.1.7. 573-96 Gigienicheskie trebovaniya k ispol'zovaniyu stochnyh vod i ih osadkov dlya orosheniya i udobreniya. M.: Minzdrav Rossii. 1997.
13. GOST R 59748 – 2021. Tekhnicheskie principy obrabotki osadkov stochnyh vod. Obshchie trebovaniya. M.: Rossijskij institut standartizacii. 2021. 24 s.
14. GOST R 54535-2011 Resursoberezhenie. Osadki stochnyh vod. Trebovaniya pri razmeshchenii i ispol'zovanii na poligonah. M.: Standartinform, 2012. 7 s.
15. GOST R 54534 – 2011 Resursoberezhenie. Osadki stochnyh vod. Trebovaniya pri ispol'zovanii dlya rekultivacii narushennyh zemel'. M.: Standartinform, 2012. 7 s.
16. Shkaredo V.A., Epshtejn A.D., Samburskij G.A. Vovlechenie produktov, poluchennyh s ispol'zovaniem OSV, v hozyajstvennyj oborot: chto dlya etogo nuzhno// *Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya*. 2023. №4. S.4-6.
17. Liangliang Wei, Fengyi Zhu, Qiaoyang Li, Chonghua Xue, Xinhui Xia, Hang Yu, Qingliang Zhao, Junqiu Jiang, Shunwen Bai. Development, current state and future trends of sludge

- management in China: Based on exploratory data and CO₂-equivalent emissions analysis // *Environment International*, Volume 144, 2020, 106093
18. Rublyovskaya O.N., Lysova T.I., Sarkisov L.F. Normativno-pravovye tendentsii i tekhnologicheskie podhody k utilizatsii osadkov stochnykh vod: mezhdunarodnaya praktika // *NDT*. 2023. № 2, S.4-10.
 19. Danilovich D.A. Energoberezhenie i alternativnaya energetika na ochestnykh sooruzheniyah kanalizatsii // *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2011. №1. S. 9-20. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.vstnews.ru/ru/archives-all/2011/2011-1/1010-energoberezheniye-i-alternativnaya-energetika>. Data obrashcheniya: 04.07.2025
 20. Karmazinov F.V., Vasil'ev B.V., Grigor'eva Zh.L. Szhiganie osadkov stochnykh vod – reshenie problemy ih utilizatsii // *Vodosnabzhenie i santekhnika*. 2008. № 9
 21. Klovov A.I., Kotovich A.I., Dzhambulov R.L., Tyukaev E.M. Ocenka sootvetstviya tekhnologii szhiganiya osadka stochnykh vod na ZSO GUP «Vodokanal Sankt-Peterburga» trebovaniyam NDT // *NDT*. 2022. № 2. S.19 -24. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://xn----gtbnrdgyt.xn--p1ai/wp-content/uploads/flipbook/139/book.html#p=21>. Data obrashcheniya: 04.07.2025
 22. Trunov P.V., Lunin S.V., Shevchenko A.A. Sovremennye energoberegayushchie tekhnologii obrabotki osadkov // *Vodoochistka, vodopodgotovka, vodosnabzhenie*. 2010. № 11. S. 38–41
 23. Danilovich D.A., Vanyushina A.Ya. Anaerobnoe sbrashchivanie – klyuchevaya tekhnologiya obrabotki osadkov gorodskikh stochnykh vod. Ch. 2 // *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2013. № 11. S. 50–56.
 24. Materialy portala po trigeneratsii, kogeneratsii i mini-TEC. Pahomov A.N. Mini-TES na biogaze: opyt MGUP «Mosvodokanal». [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/1051-Mini-TES-na-biogaze-opyt-MGUP-Mosvodokana>
 25. Vasil'eva A.V., Harlamova M.D. Sovremennye sposoby pererabotki osadkov stochnykh vod i perspektivy ih ispol'zovaniya v Rossii // *Sciences of Europe*. 2016. № 9 (9). S. 27–34.
 26. SP 32.13330.2018 Kanalizatsiya. Naruzhnye seti i sooruzheniya. SNiP 2.04.03-85. – M.: Standartinform, 2019. – 76 s.
 27. The international water association publishing. Sludge Production. https://www.iwapublishing-com.translate.google/news/sludge-production?x_tr_sl=en&x_tr_tl=ru&x_tr_hl=ru&x_tr_pto=rq#:~:text=Specific%20sludge%20production%20in%20wastewater. Data obrashcheniya: 04.07.2025
 28. Spravochnik po resursam vozobnovlyаемых istochnikov energii Rossii i mestnym vidam topliva (pokazateli po territoriyam). Pod redakciej Bez-rukih P.P. M.: «IAC Energiya», 2007. 272 s.
 29. Oficial'nyj sayt Rosstat. Chislennost' naseleniya Rossijskoj Federatsii po municipal'nym obrazovaniyam na 1 yanvarya 2023 goda. Statisticheskij byulleten'. Elektronnyj resurs. <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204>. Data obrashcheniya 06.06.2024
 30. Kuznecov A.E., Gradova N.B., Lushnikov S.V. i dr. «Prikadnaya ekobiotekhnologiya» Uchebnik dlya vysshej shkoly, tom 1, 3-e izdanie (elektronnoe). M.: BINOM. Laboratoriya znanij. 2015. 490 s.;
 31. Korznikova M.V., Blohin A.Yu., Kozlov Yu.P. Poluchenie i ispol'zovanie biogaza v Rossijskoj federatsii pri pererabotke othodov sel'skogo hozyajstva // *Vestnik RUDN, seriya «Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'no-sti»*. 2008. №3. C.17-22.
 32. Miroshnichenko I.V., Snegovoj E.V. Povyshenie effektivnosti pererabotki osadkov stochnykh vod v biogaz // *Biologiya v sel'skom hozyajstve*. 2019. №1 (22). Elektronnyj resurs. <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-pererabotki-osadkov-stochnykh-vod-v-biogaz/viewer>. Data obrashcheniya: 01.05.2024

33. Udincev D.N., Shvedov G.V., Korolyova E.S., Merzlikin A.B. Ocenka potenciala vyrabotki elektroenergii iz othodov zhiznedeyatel'nosti cheloveka v sistemah elektrosnabzheniya gorodov // ElektroEnergiya. Peredacha i raspre-delenie. 2020. №3 (60). Elektronnyj resurs. <https://eepir.ru/release/jelektrojenergija-peredacha-i-raspredel-6/.Data> obrashcheniya: 01.05.2024
34. Agarkov D.A., Bredihin S.I., Kiseleva S.V., Matveev D.V., Samojlov A.V., Tarasenko A.B., Fedotov Yu.S., Cipis E.V. Perspektivy primeneniya tver-dooksidnyh toplivnyh elementov dlya utilizacii svaloch'nogo gaza poligo-nov tverdyh kommunal'nyh othodov Rossii // Tep-loenergetika, 2023, № 1, s. 87–94
35. Xiaoli Hao, Hongxing Yang, Guoqiang Zhang. Trigenation: A new way for landfill gas utilization and its feasibility in Hong Kong// Energy Policy, 36 (2008), pp. 3662– 3673
36. John N. Kuhn, Anthony C. Elwell, Nada H. Elsayed, Babu Joseph Requirements, techniques, and costs for contaminant removal from landfill gas // Waste Man-agement 63 (2017) 246–256
37. Biogaz na osnove vozobnovlyаемого syr'ya. Sravnitel'nyj analiz 61 usta-novki po proizvodstvu biogaza v Germanii. Institut agrarnykh tekhnologij i biosistemnoj tekhniki. Bundesallee 50 • 38116 Braunschvayg • Germaniya. 2010.
38. How Much Electricity Does A Wastewater Treatment Plant Use. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.waterandwastewater.com/how-much-electricity-does-a-wastewater-treatment-plant-use/#:~:text=Use%20approximately%200.4%2D1.0%20kWh%20per%20cu-bic%20meter>. Data obrashcheniya: 04.07.2025
39. Karaeva Yu.V., Trahunova I.A. Obzor tekhnologij i metodov intensivizacii processov anaerobnogo sbrazhivaniya. Trudy Akademii. 2010. №3. S.109–127
40. Parshikova M.V., Kasatkin V.V., Kasatkina N.Yu., Litvinyuk A.A. Rezul'ta-ty issledovaniy processa anaerobnogo sbrazhivaniya othodov zhivotnovodstva i osadkov stochnykh vod s primeneniem biogazovoj ustanovki. Agro-EkoInzheneriya, 2023, №2(115), c.140-158
41. Kofman V.Ya. Uдалenie azota iz stochnykh vod. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.voda.ru/articles/udalenie-azota/ochistka-osnovnogo-potoka>. Data obrashcheniya: 04.07.2025

Energy potential of sludge in regions of Russia

^{1,1} Tatyana Andreenko, ^{1,2} Kirill Degtyarev, ^{1,3} Sofia Kiseleva, ^{1,4} Yuliya Rafikova

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: ¹ tanyandr00@mail.ru, ² kir1111@rambler.ru,
³ k_sophia_v@mail.ru, ⁴ ju.rafikova@mail.ru

Abstract. The presented work is devoted to the topic of waste disposal generated in sewage treatment plants in the form of sewage sludge. The authors' methodology for estimating the biogas yield, which takes into account the biochemical composition of the sediment, is presented. The potential production of electric and thermal energy from biogas was estimated under the assumption of using a gas turbine unit (biogas mini-PES) or a boiler house. The assessments of wastewater precipitation, biogas, and energy production were carried out for all subjects of the Russian Federation, taking into account the differentiation of the population in different parts for large-area subjects. The leaders in terms of the energy potential of sludge biomass have been identified, which are naturally represented by the most urbanized regions of the country. The assessment of the share of large cities of the Russian Federation in the energy potential of individual regions is given. Possible directions of energy transfer from biogas plants and associated power and heat generation plants are being considered.

Keywords: sewage sludge, bioenergy, biogas, energy production.

Acknowledgements. The study was carried out within the framework of the State Task No. 121051400082-4 "Geographical foundations of sustainable development of energy systems using renewable energy sources".

УДК 911.6:620.92

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-2-30-51

EDN: HIZSOU

История, география и перспективы малой гидроэнергетики России

^{1,1} Дегтярев Кирилл Станиславович [0000-0002-1738-6320],^{1,2} Кузнецова Анна Сергеевна [0009-0002-9315-1432]¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, РоссияE-mail: ¹kir1111@rambler.ru, ²annak6213@yandex.ru

Аннотация. Статья содержит ретроспективный анализ развития малой гидроэнергетики в России с выделением нескольких этапов с конца XIX века до нашего времени, оценку её современного состояния и предпосылок роста. Приводятся данные о малых гидроэлектростанциях, построенных ранее и выведенных из эксплуатации, перечень действующих малых гидроэлектростанций на территории России в настоящее время и их территориальное распределение. На основе исторического анализа, оценок потенциала малой гидроэнергетики и межстрановых сравнений сделан вывод о возможностях и целесообразности увеличения количества малых гидроэлектростанций и их совокупных мощностей минимум в 3-4 раза в обозримой перспективе в большинстве регионов страны. В то же время, обозначены существующие в настоящее время барьеры на пути развития малой гидроэнергетики, преодоление которых, вероятно, требует дополнительной государственной поддержки.

Ключевые слова: малая гидроэнергетика, регионы России, гидроэнергетический потенциал, возобновляемые источники энергии, история развития гидроэнергетики, география гидроэнергетики

1 Введение

В последнее десятилетие в России обозначился активный рост ветровой и солнечной энергетики, тогда, как темпы строительства малых гидроэлектростанций (МГЭС) существенно отстают, а количество и мощности МГЭС в России существенно меньше, чем в странах с сопоставимыми условиями. При этом в нашей стране существует длительная история развития гидроэнергетики, мощная

научно-производственная база, а большая часть страны отличается высокой концентрацией гидроэнергоресурсов на фоне сравнительно низкого потенциала и солнечной, и ветровой энергетики.

Данная ситуация требует анализа, закономерной первой стадией которого является описание истории вопроса, текущего положения дел, рассмотрения барьеров на пути развития малой гидроэнергетики, чему и посвящена представленная работа.

В первой части статьи рассмотрена история и выделены стадии развития малой гидроэнергетики России от становления и мощного роста до середины XX века, стагнации и упадка во второй половине столетия и до начала медленного восстановления в настоящее время.

Далее рассматривается текущая ситуация, проводится сопоставление фактического уровня развития малой гидроэнергетики в России и её потенциала, её территориальное распределение, предпосылки и барьеры роста.

В терминологическом плане понятия «малая энергетика» и «малые ГЭС» имеют некоторую долю условности. В России в соответствии с ГОСТ Р 51238-98 малыми ГЭС в нашей стране считаются электростанции мощностью до 30 МВт. В то же время, в нормативных документах, определяющих меры стимулирования возобновляемой энергетики, к ним относят ГЭС мощностью до 50 МВт; мы придерживаемся данного критерия.

2 Этапы развития малой гидроэнергетики России и размещение МГЭС по регионам

Гидроэнергетика в России появляется почти одновременно с развитием электроэнергетики во второй половине XIX века. Исходя из современных критериев, все ГЭС, построенные до середины 1920-х гг., могут рассматриваться как малые; запущенная в эксплуатацию в 1927 году Волховская ГЭС, на тот момент крупнейшая в стране и, более того – крупнейшая в Европе, имела мощность 58 МВт [1].

Условной датой начала эпохи гидроэнергетики в мире можно считать 1882 год, когда Т. Эдисон создал компанию, развернувшую строительство ГЭС в США, Великобритании, Италии [2]. Первая промышленная ГЭС в мире была построена в 1882 году в США (штат Висконсин) для электроснабжения г. Буффало [3].

В России первая известная ГЭС была построена в 1892 г. под руководством инженера Н.И. Кокшарова на р. Берёзовке на Алтае мощностью 250 кВт, а в 1896 – ГЭС на р. Охте под Санкт-Петербургом мощностью 270 кВт [4]; ГЭС на Охте была построена инженерами В.Н. Чиколевым и Р.Э. Класоном для электроснабжения охтинского порохового завода в Петербурге. В 1903 была построена ГЭС «Белый уголь» на Северном Кавказе на р. Подкумок мощностью 730 кВт, в 1909 г. – Гиндукушская ГЭС на р. Мургаб в Средней Азии мощностью 1,3 МВт [5].

Этот перечень далеко не полон. Новые гидроэлектростанции строились в разных концах страны, но информация о них разрознена. Один из примеров – статья «Электричество в русской деревне» из журнала «Электричество и жизнь» в одном из номеров за 2012 год, сообщающая о строительстве ГЭС на Алтае в селе

Старо-Бардинском Бийского уезда [6]. Сообщается, что оборудование поставляется и устанавливается компанией «Эрлангер», а электричество предназначено для освещения домов в селе и работы местной маслобойки – продажа продукции этого предприятия и стала источником средств для строительства станции. Дальнейшая судьба этого проекта также неизвестна, но, очевидно, он был далеко не единственным в начале прошлого столетия.

По данным, приведённым в справочнике по гидроэлектростанциям Советского Союза [7], в дореволюционной России действовало около 45 тыс. гидросиловых установок общей мощностью 500 тыс. кВт, главным образом, мельниц с различными типами водяных колёс; 20-25% приходилось на турбины, число которых достигало 5000 с единичной мощностью в среднем 30 кВт и максимумом 900 кВт. До 1913 года было построено 78 малых ГЭС общей мощностью около 9 МВт; к 1917 году их мощность составила уже 16 МВт, а годовая выработка – 37 ГВтч, хотя отмечается, по выработке электроэнергии Россия на тот момент находилась на 15 месте в мире. В качестве одной из причин можно назвать отсутствие отечественного производства гидротурбин большой мощности, которое налаживается уже в 1920-е – 1930-е гг. По состоянию на 1920 год тройку лидеров в мировом производстве электроэнергии [8] составляли США (50%), Германия (13%) и Канада (5%); на Великобританию, Норвегию, Италию и Японию приходилось по 4%, на Францию – 3%. В России в силу известных причин годы с 1914 по 1920 были неблагоприятными, в том числе, и для развития гидроэнергетики, и возобновление её роста было связано уже с планом ГОЭЛРО – государственной электрификации России.

Это был первый в истории России масштабный план электрификации страны и экономического развития в целом. План ГОЭЛРО был разработан Государственной комиссией по электрификации России под руководством Г.М. Кржижановского, одобрен 22 декабря 1920 г. VIII Всероссийским съездом советов и утвержден декретом Совета народных комиссаров «Об электрификации РСФСР» на IX Всероссийском съезде советов 23 декабря 1921 года [4]. План включал строительство в течение 10-15 лет 30 электростанций во всех основных районах страны общей установленной мощностью более 1,7 ГВт, в том числе более 0,5 ГВт ГЭС. Фактически план был перевыполнен – так, к 1935 году было построено 40 ГЭС, из них 14 – мощностью более 100 МВт, крупнейшая из которых – Днепрогэс (ДнепроГЭС) мощностью 560 МВт.

Активное строительство ГЭС продолжалось и в 1930-е – 1970-е гг. Несмотря на разрушения, связанные с Великой Отечественной войной в 1941-1945 гг., по итогу 1929-1950 гг. СССР увеличил выработку ГЭС с 0,4 млрд. кВтч до 10,6 млрд. кВтч – почти в 27 раз. Доля СССР в мировом производстве электроэнергии на ГЭС в 1950 г. составила 3,2% [8], и он вошёл в число мировых лидеров. Отметим, что в настоящее время Россия (в границах РФ) ежегодно производит около 200 млрд. кВтч гидроэлектроэнергии в год, находится по этому показателю на 5 месте в мире после Китая, Бразилии, Канады и США [9], и на неё приходится около 4% мирового производства.

В течение 1930-1960-х гг. наряду с крупными гидроэлектростанциями – такими, как ГЭС Волжского каскада, возведённые в 1950-е, в СССР строилось большое количество малых, в том числе колхозных, ГЭС, обслуживающих потребности отдельных сельских поселений и сельскохозяйственных предприятий. По

разным оценкам, в 1955 году в европейской части СССР размещалось от 4000 до 5000 МГЭС (в том числе только в Украинской ССР – почти 1000 МГЭС [10], в Белорусской ССР – 180 МГЭС [11]), а их доля в потреблении электроэнергии доходила до 27% [12] (рис. 1).

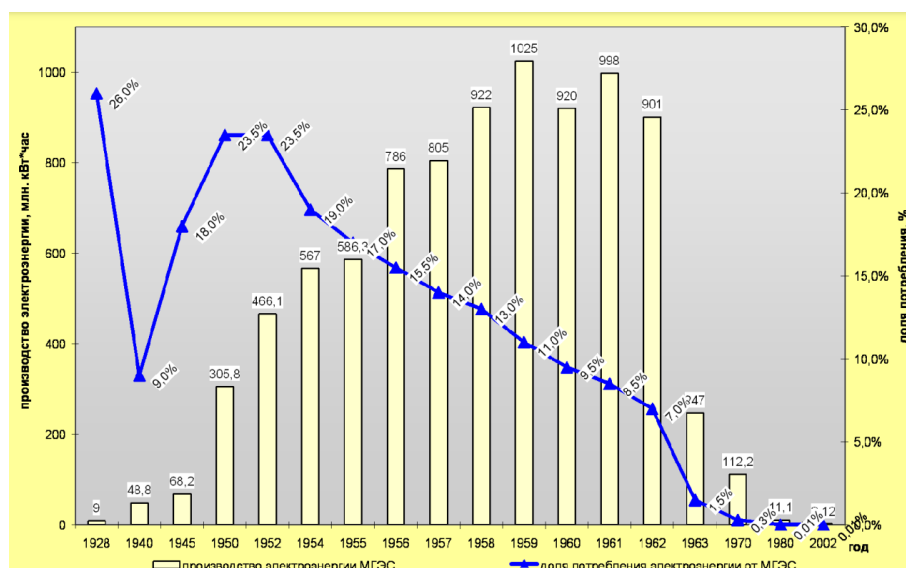


Рис. 1. Динамика производства электроэнергии на МГЭС в СССР [12]

Своего рода «золотой век» малых ГЭС в России приходится на конец 1950-х – начало 1960-х гг., когда они работали во всех или почти во всех союзных республиках ССР и во всех регионах РСФСР, за исключением Чукотского и Ненецкого автономных округов и Еврейской автономной области (рис. 2).

Однако с 1960-х снижается не только их доля в производстве электроэнергии, но и количество действующих МГЭС, которые выводят из эксплуатации. К 1980 г. в РСФСР оставалось всего 100 малых ГЭС, а к 1990 – 55 [13].

На это повлиял ряд факторов. Прежде всего, в стране продолжалось масштабное строительство крупных электростанций, включая большие ГЭС (каскад Волжских ГЭС, Братская, Красноярская, Усть-Илимская, Саяно-Шушенская; по выработке электроэнергии на ГЭС СССР в 1970-е вышел на 3-е место в мире после США и Канады), ТЭС и АЭС. На их основе создавалась и развивалась централизованная сеть электроснабжения, в настоящее время известная как Единая энергетическая система (ЕЭС) России; в этих условиях МГЭС становились экономически невыгодными.

Другая причина связана с масштабными сдвигами в структуре расселения и производства и, как следствие, потребления электроэнергии. В стране шёл процесс урбанизации и создания крупных промышленных предприятий, при котором сельское население сокращалось вследствие миграции в города. Частично это происходило и по причине целенаправленной политики 1960-х – 1970-х

годов по укрупнению населённых пунктов и увеличению концентрации производства, известной в публицистике как «ликвидация неперспективных деревень» [14]. Наконец, с 1980-х гг. свою роль сыграли и опасения экологического характера в отношении гидроэнергетики в целом – активно поднимался вопрос отрицательных эффектов, связанных с затоплением земель и изменением водных режимов.

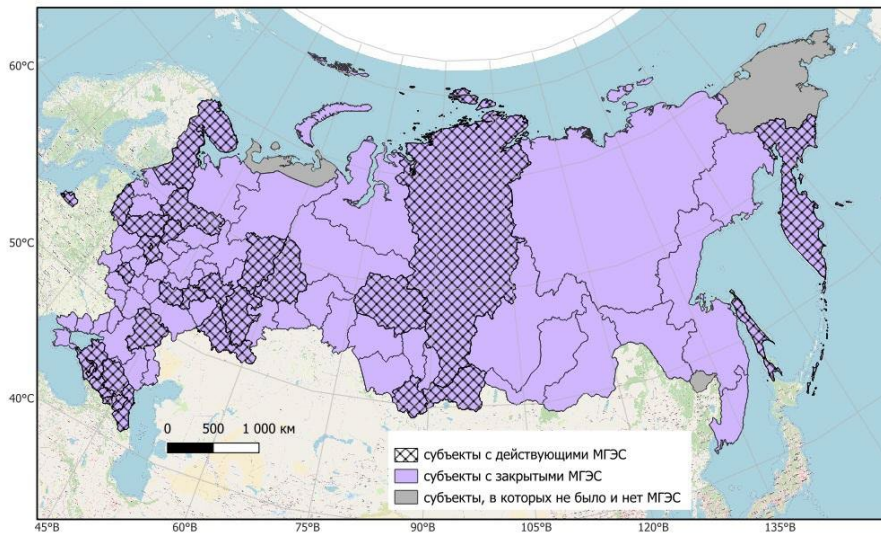


Рис. 2. Наличие МГЭС в субъектах России (составлено авторами)

Ситуация усугубилась в 1990-е годы вследствие масштабного экономического кризиса, отрицательно сказавшегося и на МГЭС ввиду снижения платежеспособности потребителей, закрытия ряда предприятий и усиления процессов оттока населения из малых населённых пунктов в крупные. В целом, производство электроэнергии в Российской Федерации с 1990 по 1998 год снизилось с 1082 млрд. кВтч до 827 млрд. кВтч [9] (после 1998 фиксируется рост производства), хотя коснулось это, прежде всего, её выработки на ТЭС; производство гидроэлектроэнергии в тот же период колебалось в интервале 154-176 млрд. кВтч, а её устойчивый рост фиксируется с 2010-х гг. с возобновлением строительства и ввода в эксплуатацию новых крупных ГЭС (Богучанской, Бурейской, Усть-Среднеканской, Нижне-Бурейской и др.).

Таким образом, в XX веке можно выделить три основных этапа развития малой гидроэнергетики в России:

1. Становление – до 1920-х;
2. Бурный рост и развитие – с 1920-х, с принятия плана ГОЭЛРО, до начала 1960-х;
3. Стагнация и упадок – с 1960-х до 1990-х включительно.

Следует добавить, что точная информация о количестве МГЭС в стране, когда-либо построенных, но выведенных из эксплуатации на данный момент, отсутствует, а приводимые в разных источниках оценки варьируются от 1,5-2 тыс. до

8 тыс. Централизованные базы данных есть по сравнительно крупным ГЭС; в частности, в справочнике Гидропроекта [7] приведены электростанции СССР мощностью от 10 МВт; в настоящее время все они находятся в эксплуатации. Таким образом, из эксплуатации выводились МГЭС мощностью менее 10 МВт. Как правило, это небольшие станции – в большинстве своём, мощностью менее даже 1 МВт, их строительство не было централизованным – решения о строительстве принимались и исполнялись на местном уровне. В настоящее время информация о них либо не сохранилась, либо сохранилась в местных архивах и в качестве краеведческих материалов, размещённых в социальных сетях и на других интернет-ресурсах. На основании изучения этих материалов нами составляется база данных, в настоящее время насчитывающая около 260 наименований МГЭС (в основном это МГЭС мощностью меньше или существенно меньше 1 МВт), на основе которой была составлена карта наличия МГЭС, представленная на рисунке 2. Согласно информации по отдельным регионам (Московская, Ленинградская, Архангельская, Владимирская области и некоторые другие), в каждой из них насчитывалось несколько десятков МГЭС. Изыскания в данном направлении продолжаются авторами в настоящее время. Интерес представляет исследование возможностей восстановления МГЭС там, где это целесообразно и осуществимо с технических и экономических позиций.

Следует отметить, что, несмотря на сложную ситуацию 1990-х, были реализованы отдельные проекты строительства МГЭС. Так, в Дагестане, были введены в эксплуатацию 5 малых ГЭС и разработана технология строительства унифицированных малых ГЭС «Прометей», что способствовало сокращению капитальных затрат; к 2007 г. по этой технологии в республике были построены 3 МГЭС: Амсарская, Аракульская и Шиназская. [15] Более того, в период с 1990 по 2000 вводились в эксплуатацию исключительно ГЭС малой мощности, всего же было построено около 20 ГЭС; максимально мощная из них – Гергебильская МГЭС в Дагестане на реке Кара-Койсу – 18 МВт; мощности остальных ГЭС от 0,05 МВт до 3,5 МВт. Большая часть была построена в республиках Северного Кавказа (Дагестан, Кабардино-Балкария, Северная Осетия, Адыгея), также малые и микро-ГЭС строились в Калининградской области, Камчатской области (ныне Камчатский край), Сахалинской области, Карелии, Ленинградской области, Московской области, Татарстане и Башкортостане.

В первое десятилетие XXI века темпы строительства и ввод ГЭС резко ускоряются, что было обусловлено выходом из экономического кризиса, началом экономического роста и, как следствие, увеличением спроса на электроэнергию. В 2001-2011 гг. в эксплуатацию введено 29 ГЭС, из них одна мощностью более 2000 МВт (Бурейская в Амурской области), одна мощностью 278 МВт (Светлинская ГЭС на р. Виллой в Якутии), две мощностью 65 МВт и 60 МВт (ГЭС Кашхатау и Аушигерская в Кабардино-Балкарии); остальные – малые и микро-ГЭС от 45 МВт (Гельбахская ГЭС в Дагестане и Юмагузинская ГЭС в Башкортостане) до 0,06 МВт. Регионы строительства МГЭС были, в основном, те же – Северный Кавказ (Ставропольский край, Краснодарский край, Дагестан, Северная Осетия, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия), регионы Поволжья и Урала (Башкортостан, Ульяновская, Кировская, Пензенская, Свердловская области), Московская и Ярославская области, Республика Алтай, Камчатский край. Также реконструкция с увеличением мощности была проведена на Волховской и Нижне-

Свирской ГЭС в Ленинградской области. В 2016 г. была введена в эксплуатацию Зеленчукская ГАЭС мощностью 300 МВт.

Со второго десятилетия XXI века создаётся нормативная база и отрабатываются механизмы поддержки возобновляемой энергетики и низкоуглеродного развития в России в целом [16], включая и малую гидроэнергетику, под которой понимаются ГЭС мощностью до 50 МВт. Ключевым механизмом стимулирования возобновляемой энергетики стал договор о предоставлении мощности (ДПМ), предполагающий возврат инвестиций на строительство станции и обеспечение определённой нормы доходности через гарантированную закупку у неё электроэнергии по определённому тарифу. Среди требований к проектам, участвующим в конкурсах ДПМ-ВИЭ – определённая норма локализации – производства оборудования для станции внутри страны, что стимулирует также отечественное энергетическое машиностроение и ряд смежных отраслей в сфере ВИЭ.

Кроме того, в ряде регионов страны приняты собственные программы поддержки возобновляемой энергетики, в частности, в Алтайском и Красноярском краях, Амурской и Белгородской областях.

Следует отметить, однако, что в существенно большей степени были стимулированы проекты солнечной и ветровой энергетики, чем малой гидроэнергетики (рис. 3). За последние 10 лет, с 2014 года, было возведено примерно по 1800 МВт мощностей солнечных (СЭС) и 2500 МВт ветровых (ВЭС) электростанций, но всего около 200 МВт мощностей МГЭС, хотя это и больше, чем в предыдущие десятилетия.

Всего с 2011 по 2024 год в России было введено около 4500 МВт гидроэнергетических мощностей, но 3000 из них приходится на крупнейшую Богучанскую ГЭС на р. Ангаре в Красноярском крае, и около 1300 – на другие крупные ГЭС (Усть-Среднеканская, Зарамагская, Нижне-Бурейская, Гоцатлинская). МГЭС в этот период было возведено около 20, преимущественно в тех же районах – лидировали северокавказские регионы, также сравнительно активно строились МГЭС в Карелии.

Как следствие медленного роста малой гидроэнергетики на фоне солнечной и, особенно, ветровой, с 2021 по 2024 год в структуре производства электроэнергии на ВИЭ (исключая ГЭС мощностью более 50 МВт) доля МГЭС упала с 39,1 до 27,5%, тогда, как доля СЭС снизилась незначительно – с 37,3 до 35,8%, а доля ВЭС выросла с 38,4 до 41,6%.

Эксперты высказывают разные точки зрения на причины отставания малой гидроэнергетики [18], среди которых, в частности, технологические (отсутствие в стране производства некоторых видов оборудования для МГЭС) и нормативные (требования к документации по МГЭС и соблюдению экологических норм те же, что и для крупных ГЭС). Вместе с тем, нельзя не отметить, что относительная стагнация гидроэнергетики в целом на фоне бурного роста ветровой и солнечной энергетики является общемировой тенденцией.

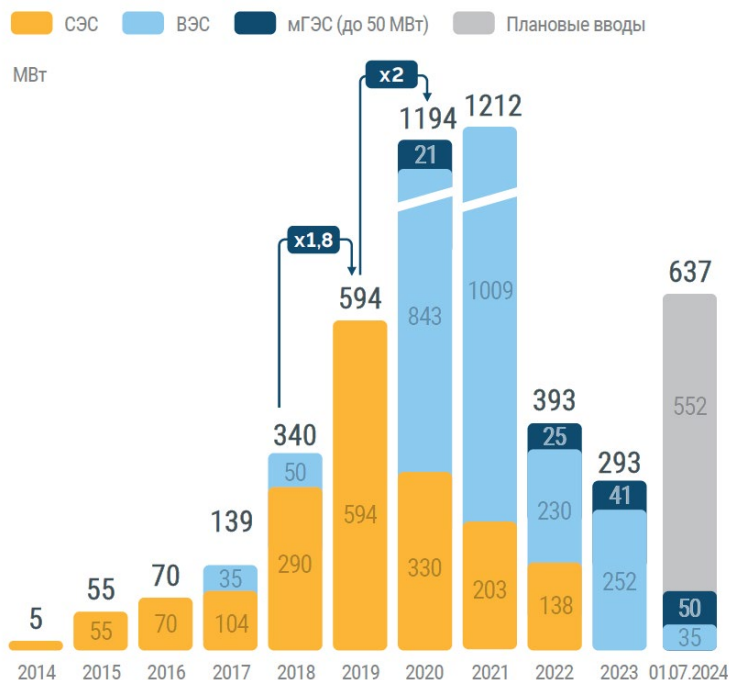


Рис. 3. Динамика ввода объектов ВИЭ-генерации (2014-2024 гг.) в рамках ДПМ ВИЭ, МВт [17]

Так, с 2010 по 2023 год мировое годовое производство электроэнергии [9] на ГЭС выросло с 3430 до 4240 млрд. кВтч – на 24% (при этом, более 60% всего роста произошло за счёт Китая, где производство гидроэлектроэнергии увеличилось с 711 до 1226 млрд. кВтч.); на ВЭС выработка электроэнергии выросла с 346 до 2325 млрд. кВтч – почти в 7 раз; на СЭС – с 34 до 1642 млрд. кВтч – в 48 раз.

Вероятно, главные фундаментальные причины заключаются в меньших естественных ограничениях для строительства ВЭС и СЭС по сравнению с ГЭС и в существенно меньших инвестиционных затратах. По данным IRENA [19], в 2023 году удельные инвестиционные затраты для ГЭС составили \$2806 на 1 кВт установленной мощности (при этом затраты выросли на 44% по сравнению с 2010 годом), для ВЭС на суше – \$1160 (при этом с 2010 года снизились на 49%), для СЭС – \$758 (снижение за тот же период на 86%).

Тем не менее, всего за постсоветский период в России было построено около 70 МГЭС и микро-ГЭС общей мощностью почти 450 МВт. Период с конца XX - начала XXI до настоящего момента можно обозначить как период медленного восстановления после стагнации и упадка 1960-х – 1990-х.

Наряду с новым строительством и реконструкцией МГЭС продолжался и вывод из эксплуатации некоторых МГЭС, работавших ранее; в то же время обозначился, хотя на данный момент и слабо, процесс восстановления некото-

рых заброшенных МГЭС. Так, ведётся ремонт старых гидротехнических сооружений в Ленинградской области [20,21] с возможностью восстановления части из них в качестве генерирующих объектов. Довольно активно процесс восстановления малых ГЭС идёт в Белоруссии [22], где с 1992 года было восстановлено и вновь пущено в эксплуатацию около 20 ранее заброшенных МГЭС [23], хотя это всего 10% от количества МГЭС, работавших в республике в 1950-е гг. Есть основания полагать, что в текущих условиях восстановление части, возможно – существенной, ранее законсервированных или заброшенных малых гидроэлектростанций, имеет перспективу.

3 Современное состояние и предпосылки развития малой гидроэнергетики России

Наиболее длительная история развития возобновляемой энергетики в России связана с гидроэлектростанциями, и в настоящее время на них приходится более 90% всех электроэнергетических мощностей, работающих на ВИЭ. Россия отличалась развитой гидроэнергетикой ещё в советский период. Если в середине XX века большую роль играли малые ГЭС (мощностью до десятков МВт), обеспечивавшие потребности в электроэнергии в локальном масштабе – на уровне отдельных районов и населённых пунктов, которых к 1950-м гг. насчитывалось несколько тысяч [3], то далее была сделана ставка, главным образом, на крупные гидроэлектростанции. В середине и второй половине XX века была построена основная часть Волжско-Камского каскада и крупнейшие ГЭС в Сибири – Саяно-Шушенская, Красноярская, Братская, Усть-Илимская. При этом, число действующих малых ГЭС резко сократилось – до нескольких десятков, однако с начала XXI века наблюдается некоторая активизация их строительства.

Закономерности распределения объектов в рамках производственного комплекса, связанного с малой гидроэнергетикой, в основном те же, что и в случае с возобновляемой энергетикой в целом, когда производство оборудования привязано преимущественно к старопромышленным районам и предприятиям, созданным ещё в советский период, а строительство электростанций – к территориям с максимальными природными ресурсами [24].

Центры производства оборудования и разработки проектов для МГЭС расположены, в частности, в Москве (ООО «ПромГидроЭнергоМаш»), Санкт-Петербурге (АО МНТО «ИНСЭТ»), Екатеринбурге (НПО «Электромаш»).

Что касается малых ГЭС (до 50 МВт), то по состоянию на конец 2024 года их в России насчитывалось около 130 общей мощностью 1300 МВт (табл. 1). Максимальная концентрация и большая часть суммарной мощности сосредоточена на Северном Кавказе, на который приходится почти половина и самих МГЭС, и их совокупной мощности. Второй по мощности центр – Северо-запад европейской части страны (главным образом, Карелия и Кольский полуостров). На третьем месте – Урал (главным образом, за счёт Башкортостана), на четвёртом – Москва и Московская область. По остальным регионам распределены единичные МГЭС. К востоку от Урала их насчитывается всего 12, хотя в настоящее время существуют планы строительства МГЭС также в сибирских и дальневосточных

регионах, отличающихся, в целом, наибольшим объемом гидроэнергетических ресурсов в стране.

Таблица 1. Распределение действующих МГЭС России по регионам на конец 2024 г. (составлено авторами с использованием данных [25-32])

Субъект РФ	Количество МГЭС	Общая мощность, МВт	Наименования станций
Северный Кавказ			
	52	556,4	
Респ. Карачаево-Черкесия	10	112,4	ГЭС-1, Красногорская-1, Красногорская-2, Кубанская ГАЭС, МГЭС на р. Большой Зеленчук, Новокарачаевская, Правокубанская, Усть-Джегутинская, Учкуланская, Эшкаконская
Ставропольский край	10	98,8	Барсучковская, Горько-Балковская, Егорлыкские 1 и 2, Ессентукская, Новотроицкая, Орловская, Проянская, Свистухинская, Сенгилеевская
Респ. Северная Осетия – Алания	8	96,1	Беканская, Гизельдонская, Зарамагская, Дзауджикауская, Коратурдонская, Павлодольская, Фаснальская, Эзминская
Респ. Дагестан	12	94,1	Агульская, Амсарская, Аракульская, Ахтынская, Бавтугайская, Гельбахская, Гергебильская, Гунибская, Курушская, Магинская, Чирюртская, Шиназская
Респ. Кабардино-Балкария	6	73,0	Акбашская, Баксанская, Верхнебалкарская, ГЭС -3 на канале Баксан-Малка, Зарагжская, Мухольская
Краснодарский край	3	71,1	Белореченская, Краснополянская, М. Краснополянская
Респ. Адыгея	2	9,6	Майкопская, ГЭС на Майкопском водоводе
Чеченская Респ.	1	1,3	Кокадой
Северо-Запад			
	28	488,56	

Субъект РФ	Количество МГЭС	Общая мощность, МВт	Наименования станций
Респ. Карелия	18	279,76	Беломорская, Белопорожские 1 и 2, Выгостровская, Игнойла, Каллиокоски, Кондопожская, Ляскеля, Палако ргская, Пальеозерская, Пиени-Йоки, Питкякоски, Подужемская, Рюмякоски, Суури-Йоки, Харлу, Хямекоски, Юшкозерская
Мурманская обл.	7	182,5	Кайтакоски, Кислогубская ПЭС, Нива ГЭС-1, Нижне-Териберская, Раякоски, Хевоскоски, Янискоски
Вологодская обл.	3	26,3	Вытегорская ГЭС 31, Вытегорская ГЭС 32, Шекснинская
Урал			
	12	112,6	
Респ. Башкортостан	7	57,1	Авзян, Кага, Мечетлинская, Нугушская, Слакская, Узян, Юмагузинская
Пермский край	1	23,8	Широковская
Оренбургская обл.	1	22,5	Ириклинская
Свердловская обл.	3	9,2	Верхотурская, Вогульская, Киселёвская
Москва и Московская обл.			
	14	83,6	
г. Москва	3	36,0	Карамышевская, Перервинская, Сходненская №193
Московская обл.	11	47,6	Акуловская, Верхнерузская, Ивановская, Истринская, Листвянская, Можайская, Озернинская, Перепадная ГЭС-32, Пироговская №199, Рузская-2, Рузская-34
Другие регионы европейской части России			
	14	32,9	
Волгоградская обл.	1	22,0	Межшлюзовая
Псковская обл.	2	3,0	Максютинская, Шильская
Тверская обл.	2	2,6	Новотверецкая, Новоцинская
Калининградская обл.	3	1,7	Заозёрная, Озёрская, Правдинская ГЭС - 3

Субъект РФ	Количество МГЭС	Общая мощность, МВт	Наименования станций
Ульяновская обл.	2	1,7	Ульяновские 1 и 2
Орловская обл.	1	1,2	Лыковская
Респ. Татарстан	1	0,3	Карабашская
Пензенская обл.	1	0,2	Сурская
Ярославская обл.	1	0,2	Хоробровская
Сибирь и Дальний Восток			
	12	56,2	
Камчатский край	4	46,9	Быстринская, Толмачёвские (1-я, 2-я, 3-я)
Красноярский край	1	5,4	Енашиминская
Респ. Алтай	2	1,0	Джазатор, Кайру
Сахалинская обл.	2	1,6	Северокурильские МГЭС 1 и 2
Томская обл.	1	1,1	Томская
Респ. Тыва	2	0,2	Кызыл-Хая, Уш-Бельдыр

Для оценки предпосылок роста можно обратиться к существующим оценкам потенциала гидроэнергетики России, а также к межстрановым сравнениям.

Значения технического потенциала малой гидроэнергетики в отдельных регионах России оценивается [33] в величину до 100 млрд. кВтч и выше (рис. 4), что на данный момент в 20 раз больше, чем количество электроэнергии, производимой всеми МГЭС России, исходя из их общей мощности 1300 МВт и коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), равного 0,4.

В справочнике по ресурсам возобновляемых источников энергии России [34] приведены оценки технического потенциала малой гидроэнергетики в 372 млрд. кВтч, экономического – в 205 млрд. кВтч, что в 40 раз выше фактического производства электроэнергии на МГЭС.

По оценкам «Гидропроекта» [7], экономический потенциал гидроэнергоресурсов СССР составлял 1095 млрд. кВтч, что в 4 раза выше фактического производства гидроэлектроэнергии всеми странами бывшего СССР в совокупности в настоящее время, а экономический гидроэнергетический потенциал современной России – 852 млрд. кВтч [35], что означает степень его освоённости всего в 20-25%.

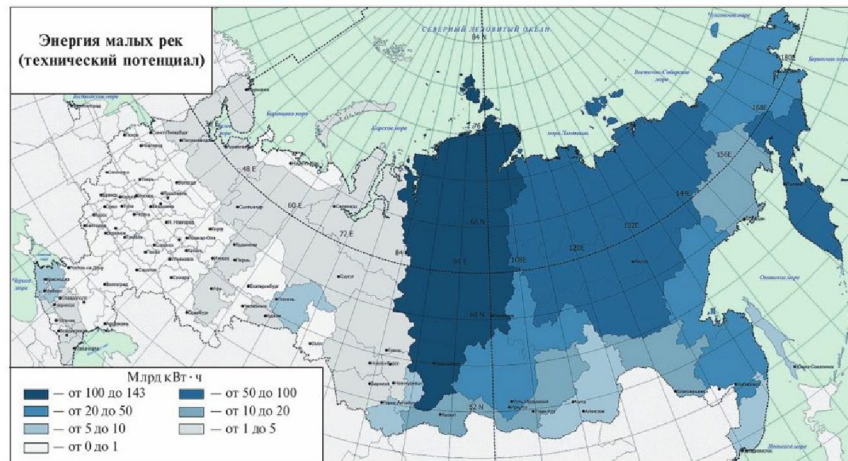


Рис. 4. Технический потенциал малой гидроэнергетики. Детализация потенциала по субъектам РФ [33].

Недооценённость гидроэнергетики в целом и малой в частности иллюстрируется и сравнением России со странами, обладающими сходными условиями, прежде всего, Канадой. При сходстве природных условий, в 3,7 раза меньшей численности населения и в 1,8 раз меньшем объёме речного стока (примерно равном в пересчёте на единицу площади) производство электроэнергии в Канаде больше, чем в России, в 1,8 раза, т.е. гидроэнергетические ресурсы используются с интенсивностью, в 3,2 раза большей, что оказывается близко к вышеприведённым оценкам степени использования гидроэнергетического потенциала России. При этом общая установленная мощность ГЭС в Канаде в 1,5 раза больше, чем в России, а общее количество ГЭС, и ГЭС мощностью менее 50 МВт в 2,5 раза больше (табл. 2).

Таблица 2. Сопоставление гидроэнергетических ресурсов России и Канады и их использования

Показатель	Россия	Канада
Площадь (2022), тыс. км ²	17 125	9 985
Население (2024), тыс. чел.	146 151	39 742
Объём речного стока крупнейших рек 1-го порядка, км ³ /год	3 039 [36,37]	1 650 [38, 39]
Объём речного стока, тыс. м ³ /км ² в год	177	165
Общий объём производства электроэнергии, млрд. кВтч (2023) [9]	1 178	633
Объём производства электроэнергии на ГЭС, млрд. кВтч (2023) [9]	201	364
Плотность годового производства гидроэлектроэнергии, кВтч/км ²	11 731	36 455
Годовое производство гидроэлектроэнергии относительно объёма речного стока, кВтч/км ³	66 140	220 606

Показатель	Россия	Канада
Душевое производство гидроэлектроэнергии, кВтч/чел. в год	1 375	9 159
Общая мощность ГЭС, МВт (2023)	51 248	76 844 [40,41]
<i>Средний КИУМ ГЭС, %</i>	<i>45%</i>	<i>54%</i>
<i>Средняя мощность ГЭС, МВт</i>	<i>260</i>	<i>154</i>
Общее количество ГЭС, в т.ч. мощностью:	197	500
1000 МВт и выше	14	20
500-1000 МВт	8	20
300-500 МВт	8	18
100-300 МВт	17	59
50-100 МВт	18	37
30-50 МВт	15	22
20-30 МВт	14	25
10-20 МВт	11	56
Менее 10 МВт	92	243

Кроме того, даже в небольших странах количество МГЭС сопоставимо с нынешним российским или даже выше; так, в Чехии эксплуатируется 118 МГЭС суммарной мощностью 128 МВт и 140 мини-ГЭС суммарной мощностью 46 МВт, в Швеции – 1200 МГЭС [23].

Частично разрыв между Канадой и Россией не в пользу нашей страны может объясняться более выгодным расположением гидроэнергоресурсов в Канаде относительно потребителей – большая доля гидроэнергетического потенциала приходится на южные населённые территории. Основная часть ГЭС Канады концентрируется в бассейнах Великих озёр, реки св. Лаврентия и на юге полуострова Лабрадор (при этом почти 50% всех гидроэнергетических мощностей – в одной провинции Квебек), значительная часть также на реках бассейна Тихого океана в провинциях Британская Колумбия и Альберта [41-47].

Условия Швеции и Чехии также в среднем благоприятнее российских для развития гидроэнергетики.

В России 75–80% всего речного стока формируется на реках бассейна Северного Ледовитого океана, в зонах экстремальных природных условий и с общей численностью населения, не превышающей 6% всего населения России.

Кроме того, дополнительным фактором торможения развития гидроэнергетики в России стала разработка крупнейших газовых месторождений севера Западной Сибири, начиная с 1960-х, что дало возможность использования для производства электроэнергии относительно дешёвого и экологически чистого (по сравнению с углём и нефтепродуктами) топлива.

В то же время МГЭС и в целом ГЭС отсутствуют даже в ряде предгорных и горных районов южной части России (Кавказ, горы юга Сибири и Дальнего Востока) с большим количеством водотоков, обладающих заметными уклонами и водностью. Так, нет гидроэлектростанций в Ингушетии, Алтайском крае, Бурятии, Забайкальском, Хабаровском и Приморском краях. Суммарная мощность ГЭС составляет в Краснодарском крае 71 МВт, в Адыгее 10 МВт, в Чечне менее

2 МВт, в Республике Алтай – 1 МВт, в Тыве – менее 0,1 МВт, в Камчатском крае – 47 МВт, в Сахалинской области – менее 2 МВт (все на Курильских островах при их отсутствии на острове Сахалин).

Строительство МГЭС возможно и в равнинных районах с достаточным увлажнением и густой сетью водотоков, с использованием локальных перепадов высот, связанных с местными возвышенностями, где падение водотоков от истоков до устья может достигать десятков и даже сотен метров.

К таким геоморфологическим структурам в центре и на севере европейской части России относятся, в частности:

- возвышенность Северные Увалы (Вологодская, Костромская, Кировская области и Республика Коми);
- Западные склоны Северного и Среднего Урала (Республика Коми, Пермский край);
- Валдайская возвышенность (Тверская область и юго-восток Новгородской области);
- Смоленско-Московская возвышенность (юг Ярославской, запад Владимирской, север и запад Московской области, Смоленская область);
- Среднерусская возвышенность (юг и юго-запад Московской области, Тульская, Калужская области и, юго-запад Рязанской области);
- Приволжская возвышенность (Нижегородская и Ульяновская области, Республика Мордовия).

В половине перечисленных выше регионов ГЭС либо отсутствуют, либо представлены небольшим числом.

Очевидно, что ведущим в упадке малой гидроэнергетики в России, начиная с 1960-х, стал экономический фактор, и что он действует и в настоящее время. В то же время, в случае с ГЭС высокий объём инвестиций компенсируется экономическими выгодами в долгосрочном плане, связанными с меньшими операционными затратами по сравнению с ТЭС, работающими на ископаемом топливе. Если сравнивать малую гидроэнергетику с солнечной и ветровой, то в пользу ГЭС, включая МГЭС, говорят более высокий КИУМ, более длительные сроки службы, а также недостаток солнечных и ветровых ресурсов на большей части территории России – во внутриконтинентальных районах центра и севера европейской части России, Сибири и Дальнего Востока, при высокой концентрации там водных ресурсов.

Дополнительным аргументом в пользу локальных МГЭС является и повышение качества и надёжности энергоснабжения. В своё время вывод из эксплуатации большого количества МГЭС имел отрицательный эффект для устойчивости энергосистемы в целом, связанный с «выпадением» её низового уровня и приобретением энергосетью более разомкнутой формы [48, 49].

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о наличии в России достаточно мощных предпосылок, долгосрочной энергетической и экономической целесообразности существенного увеличения числа и суммарной мощности МГЭС в большинстве регионов страны, но, вероятно, это требует разработки дополнительных специфических мер государственной поддержки именно для малой гидроэнергетики.

4 Выводы

В истории малой гидроэнергетики в России на данный момент можно выделить 4 этапа:

1. Становление (конец XIX – начало XX века);
2. Активный рост и расцвет (1920-е – 1960-е гг.);
3. Стагнация и упадок (1960-е – 1990-е гг.)
4. Медленное восстановление (с 2000-х гг.).

Упадок в прошлые десятилетия и низкие темпы роста в настоящее время связаны с комплексом ресурсных, экономических, технологических и нормативных факторов, при этом стагнация гидроэнергетики в целом на фоне бурного роста солнечной и ветровой энергетики с начала XXI века характерна для мира в целом, за исключением отдельных стран.

Оценки технического и экономического потенциала малой гидроэнергетики, с одной стороны, и межстрановые сопоставления – с другой, в совокупности с историческим анализом, показывают большую степень недооценённости малой гидроэнергетики в России – минимум в 3-4 раза, по максимальным оценкам – в 40 раз. Увеличение числа и совокупной мощности МГЭС в большинстве регионов страны имеет долгосрочную энергетическую и экономическую целесообразность, но в текущей ситуации, вероятно, требует дополнительных мер поддержки.

Литература

1. Каскад Ладожских ГЭС [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tgc1.ru/production/complex/spb-branch/ladoga/> (Дата обращения: 25.06.2025).
2. History of Hydropower [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.energy.gov/eere/water/history-hydropower> (Дата обращения: 25.06.2025).
3. История развития гидроэнергетики: Первые гидроэлектростанции в мире [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gidroproekt.uz/ru/press-center/58> (Дата обращения: 30.06.2025).
4. Дегтярев К.С., Залиханов А.М., Соловьев А.А., Соловьев Д.А. План ГОЭЛРО и возобновляемые источники энергии // *Энергетическая политика*. — 2016. — № 3. — С. 55–64.
5. Музей энергии [Электронный ресурс]. – URL: <https://energymuseum.ru/history/1886/> (Дата обращения: 30.06.2025).
6. Наука и жизнь в начале XX века [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/21179/> (Дата обращения: 30.06.2025).
7. Гидроэлектростанции Советского Союза. Часть I. М., Гидропроект, 1978.
8. The rise and stall of world electricity efficiency: 1900-2017, results and implication for the renewables transitions. Ricardo Pintoa, Sofia T. Henriquesa,b , Paul E. Brockwayc , Matthew Kuperus Heund and Tânia Sousaa. [Электронный ресурс]. – URL: https://mpa.ub.uni-muenchen.de/112530/1/MPRA_paper_112530.pdf (Дата обращения: 30.06.2025).
9. Statistical Review of World Energy – 2024. [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (Дата обращения: 30.06.2025).

10. Василько П.Ф., Вихорев Ю.А., Озорин Д.Ф. Современное состояние, потенциал и перспективы развития малой гидроэнергетики Украины // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. - № 8(100). – с. 107-114.
11. Калинин М.Ю., Альферович В.Н. Гидроэнергия в Беларуси. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.eecca-water.net/file/kalinin_alferovich.pdf (Дата обращения: 30.06.2025).
12. Презентация Я.И.Бляшко, к.т.н. Генеральный директор МНТО «ИНСЭТ» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hse.ru/data/2018/06/10/1149857960/%D0%91%D0%BB%D1%8F%D1%88%D0%BA%D0%BE%D0%AF%D0%98.pdf> (Дата обращения: 30.06.2025).
13. Развитие малой гидроэнергетики как одно из направлений энергосберегающей политики России, презентация АО «Институт Гидропроект» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hse.ru/data/2018/06/10/1149857883/%D0%92%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%95%D0%98.pdf> (Дата обращения: 30.06.2025).
14. «Неперспективные деревни» [Электронный ресурс]. – URL: <https://bigenc.ru/c/neperspektivnye-derevni-6c3ba9> (Дата обращения: 30.06.2025).
15. Малая гидроэнергетика: проблемы, трудности и пути их преодоления О.Е. Коновалова, Е.А. Иванова // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. №2 (15). [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/malaya-gidroenergetika-problemy-trudnosti-i-puti-ih-preodoleniya/viewer> (Дата обращения: 10.04.2025).
16. Дегтярев К. С., Синюгин О. А., Берёзкин М. Ю. Развитие финансово-рыночных инструментов низкоуглеродного развития в России // *Окружающая среда и энергосодержание*. — 2023. — № 2. — С. 16–29.
17. Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития, информационный бюллетень АРВЭ, июль 2024 г. [Электронный ресурс]. – URL: https://rreda.ru/upload/iblock/c86/ck53fh9u065bliscovlumxq02gqvkcx/202408_RRE_DA_annual_RES_report.pdf (Дата обращения: 27.06.2025).
18. Современное состояние и задачи по развитию малой гидроэнергетики, Я.И.Бляшко [Электронный ресурс]. – URL: https://www.eriras.ru/files/7_blyashko_ya.i._proekty_maloy_gidroenergetiki_v_rossii.pdf (Дата обращения: 27.06.2025).
19. Renewable Power Generation Costs in 2023 [Электронный ресурс]. - URL: <https://web.archive.org/web/20250422022730/https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> (Дата обращения: 27.06.2025).
20. Гидротехнические сооружения Ленобласти: проблемы и перспективы [Электронный ресурс]. - URL: <https://spbvedomosti.ru/news/gorod/gidrotekhnicheskie-sooruzheniya-lenoblasti-problemy-i-perspektivy/> (Дата обращения: 27.06.2025).
21. Андреевская минигидроэлектростанция [Электронный ресурс]. - URL: https://web.archive.org/web/20110223133951/http://www.inset.ru/r_equ/Andreew.htm (Дата обращения: 27.06.2025).
22. Жигальская Л.О. Экономико-географические особенности развития гидроэлектроэнергетики в Беларуси // *Окружающая среда и энергосодержание*. – 2019 - №1. – с.51-64.
23. Лихацкий Г.Н. Малая гидроэнергетика в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. - URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/6098/422-425.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Дата обращения: 27.06.2025).
24. Дегтярев К. С., Синюгин О. А. Территориальная организация возобновляемой электроэнергетики России // *Окружающая среда и энергосодержание*. — 2024. — № 1. — С. 36–50.
25. Малые гидроэлектростанции (МГЭС) [Электронный ресурс]. - URL: <https://energybase.ru/power-plant/small-hydroelectric> (Дата обращения: 27.06.2025).

26. Ассоциация развития возобновляемой энергетики (АРВЭ) [Электронный ресурс]. – URL: <https://rreda.ru/industry/imap/> (Дата обращения: 28.06.2025)
27. ГИС ВИЭ России, МГЭС и ПЭС [Электронный ресурс]. – URL: <https://gisre.ru/gis-objects-map/?type=e-water> (Дата обращения: 28.06.2025)
28. ГЭС на сайте ассоциации «Гидроэнергетика России» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hydropower.ru/map/> (Дата обращения: 28.06.2025)
29. Обосновывающие материалы: схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2023–2028 годы [Электронный ресурс]. – URL: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/future_plan/public_discussion/2023/final/00_public_sipr_ups_2023-28_fin.pdf (Дата обращения: 28.06.2025)
30. Возобновляемая энергия. Гидроэлектростанции России, справочник ПАО «Рус-Гидро» и Ассоциации «Гидроэнергетика России» совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого [Электронный ресурс]. – URL: https://vk.com/doc16716709_646454286?hash=jvH3cOlyDnPtRNR6GJZPjmLvHJwUzed530RLbtLZLcg (Дата обращения: 28.06.2025).
31. Карта ГЭС России [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.google.ru/maps/d/embed?mid=1Jxg-URtC9aIYiKfU-gnvUpmsJ94&ll=46.9463118258339%2C65.01919158291255&z=3> (Дата обращения: 28.06.2025).
32. Малые гидроэлектростанции [Электронный ресурс]. – URL: <https://energoseti.ru/stations/malye-gidroelektrostancii> (Дата обращения: 28.06.2025).
33. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / Т. И. Андреев, Т. С. Габдрахманова, О. В. Данилова и др. — РХТУ им. Д.И.Менделеева Москва, 2015. — 160 с.
34. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям). Под ред. П.П. Безруких. М., ИАЦ «Энергия», 2007.
35. Гидроэлектростанции России. Гидропроект - Москва, 1998.
36. Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2017 году (Статистический сборник) / Под ред. Н.Г. Рыбальского, В.А. Омеляненко и А.Д. Думнова. – М.: НИИ-Природа, 2018. – 230 с.
37. База данных Федерального агентства «Росводресурсы». [Электронный ресурс]. – URL: <https://gis.favr.ru/opendata> (Дата обращения: 28.06.2025).
38. Leading rivers in Canada, based on discharge volume [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.statista.com/statistics/574103/greatest-rivers-in-canada-based-on-discharge-volume/> (Дата обращения: 28.06.2025).
39. Water Sources. Rivers. Government of Canada. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/water-overview/sources/rivers.html#canada> (Дата обращения: 28.06.2025).
40. GlobalEnergyMonitor [Электронный ресурс]. – URL: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-hydropower-tracker/tracker-map/> (Дата обращения: 28.06.2025).
41. Hydro Power Plants in Canada. [Электронный ресурс]. – URL: <https://database.earth/energy/power-plants/hydro-power/canada> (Дата обращения: 28.06.2025).
42. Ontario Power Generation. [Электронный ресурс]. – URL: <https://web.archive.org/web/20100827044648/http://www.opg.com/power/OPGmap0309.pdf> (Дата обращения: 28.06.2025).
43. Newfoundland and Labrador Hydro, Bay d'Espoir Hydroelectric Generating Facility [Электронный ресурс]. – URL: <https://ar->

- chive.fo/20130101210528/http://www.nlh.nl.ca/HydroWeb/NLHydroWeb.nsf/LookupGeneratingFacilities/Bay%20d'Espoir%20Hydroelectric%20Generating%20Facility?OpenDocument (Дата обращения: 28.06.2025).
44. Columbia Power Corporation. Annual Report. 2014. [Электронный ресурс]. – URL: <https://web.archive.org/web/20110723012656/http://www.columbiapower.org/content/cpc-final-annual-report-09-10-lowres.pdf> (Дата обращения: 28.06.2025).
 45. Manitoba Hydro (2015), Your Energy: Manitoba Hydro-Electric Board 64th Annual Report For the Year Ended March 31, 2015 (PDF), Winnipeg: Manitoba Hydro, p. 93 [Электронный ресурс]. – URL: https://web.archive.org/web/20160304113715/https://www.hydro.mb.ca/corporate/ar/pdf/annual_report_2014_15.pdf (Дата обращения: 28.06.2025).
 46. Statistics Canada, Electric Power Generating Stations, 2004 (Catalog 57-206), Ottawa: Statistics Canada, pp. 19–50, quoted in: Newfoundland and Labrador Hydro (2006); Annual Electric Power Generating Stations Survey (EPGS) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.statcan.gc.ca/en/survey/business/2193> (Дата обращения: 28.06.2025).
 47. About Renewable Energy in Canada. [Электронный ресурс]. – URL: <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/energy-sources-distribution/renewable-energy/about-renewable-energy-canada/7295> (Дата обращения: 28.06.2025).
 48. Атаев З.А. Территориальная организация локальной энергетики Центрального экономического района России. Диссертация на соискание учёной степени доктора географических наук. Москва, ИГРАН, 2008.
 49. Атаев З.А. Пространственный каркас локальных систем электроэнергетики (на примере Московской области). // Известия РАН. Серия географическая – 2007. - № 2, с. 84–95.

References

1. Kaskad Ladozhskikh GE'S [website] – URL: <https://www.tgc1.ru/production/complex/spb-branch/ladoga> (Access 25.06.2025).
2. History of Hydropower [website] – URL: <https://www.energy.gov/eere/water/history-hydropower> (Access 25.06.2025).
3. Istoriya razvitiya gidroenergetiki. Pervye gidroelektrostancii v mire [website] – URL: <https://www.gidroproekt.uz/ru/press-center/58> (Access 30.06.2025).
4. Degtyarev K.S., Zalikhanov A.M., Solovev A.A., Solovev D.A. Plan GOELRO i vozobnovlyemye istochniki energii. E"nergeticheskaya politika. — 2016. — 3. — pp. 55–64.
5. Muzej energii [website] – URL: <https://energymuseum.ru/history/1886> (Access 30.06.2025).
6. Nauka i zhizn v nachale XX veka [website]. – URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/21179> (Access 30.06.2025).
7. Gidroelektrostancii Sovetskogo Soyuza. Chast I. M., Gidroproekt 1978.
8. The rise and stall of world electricity efficiency 1900-2017. Results and implication for the renewables transitions. Ricardo Pinto Sofia T. Henriquesab Paul E. Brockwayc Matthew Kuperus Heund and Tânia Sousaa. [website]. – URL: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/112530/1/MPRA_paper_112530.pdf (Access 30.06.2025).
9. Statistical Review of World Energy – 2024. [website]. - URL: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (Access 30.06.2025).
10. Vasko P.F. Vixorev Yu.A. Ozorin D.F. Sovremennoe sostoyanie potencial i per-spektivy razvitiya maloj gidroenergetiki Ukrainy Alternativnaya energetika i ekologiya. – 2011. - 8(100). – pp. 107-114.

11. Kalinin M.Yu. Alferovich V.N. Hidroenergiya v Belarusi. [website]. – URL: http://www.eecca-water.net/file/kalinin_alferovich.pdf (Access 30.06.2025).
12. Prezentaciya Ya.I.Blyashko k.t.n. Generalnyj direktor MNT O «INSET» [website]. – URL: <https://www.hse.ru/data/2018/06/10/1149857960/%D0%91%D0%BB%D1%8F%D1%88%D0%BA%D0%BE%20%D0%AF.%D0%98..pdf> (Access 30.06.2025).
13. Razvitie maloj gidroenergetiki kak odno iz napravlenij energosberegayushhej poli-tiki Ros-sii prezentaciya. AO «Institut Gidroproekt» [website]. – URL: <https://www.hse.ru/data/2018/06/10/1149857883/%D0%92%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%95.%D0%98..pdf> (Access 30.06.2025).
14. «Neperspektivnye derevni» [website]. - URL: <https://bigenc.ru/c/neperspektivnye-derevni-6c3ba9>. – URL: <https://bigenc.ru/c/neperspektivnye-derevni-6c3ba9> (Access 30.06.2025).
15. Malaya gidroenergetika: problemy trudnosti i puti ix preodoleniya O.E. Konovalova, E.A. Ivanova. Trudy Kolskogo nauchnogo centra RAN. 2013. 2 (15). [website]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/malaya-gidroenergetika-problemy-trudnosti-i-puti-ih-preodoleniya/viewer> (Access 10.04.2025).
16. Degtyarev K. S. Sinyugin O. A. Beryozkin M. Yu. Razvitie finansovo-rynochnyx instrumentov nizkouglerodnogo razvitiya v Rossii Okruzhayushhaya sreda i energosnabzhenie. — 2023. — 2. — pp. 16–29.
17. Rynok vozobnovlyaemoy energetiki Rossii tekushhiy status i perspektivy razvitiya informacionnyj byulleten ARVE. July 2024 [website]. – URL: https://rreda.ru/upload/iblock/c86/ck53fh9u065bliscovlumxq02gqvkcx/202408_RRE_DA_annual_RES_report.pdf (Access 27.06.2025).
18. Sovremennoe sostoyanie i zadachi po razvitiyu maloj gidroenergetiki. Ya.I.Blyashko [website]. – URL: https://www.eriras.ru/files/7_blyashko_ya.i._proekty_maloy_gidroenergetiki_v_rossii.pdf (Access 27.06.2025).
19. Renewable Power Generation Costs in 2023 [website]. - URL: <https://web.archive.org/web/20250422022730/https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> (Access 27.06.2025).
20. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya Lenoblasti - problemy i perspektivy [website]. - URL: <https://spbvedomosti.ru/news/gorod/gidrotekhnicheskie-sooruzheniya-lenoblasti-problemy-i-perspektivy> (Access 27.06.2025).
21. Andreevskaya minigidroelektrostanciya [website]. - URL: https://web.archive.org/web/20110223133951/http://www.inset.ru/r_equ/Andreew.htm (Access 27.06.2025).
22. Zhigalskaya L.O. Ekonomiko-geograficheskie osobennosti razvitiya gidroelektro-energetiki v Belarusi. Okruzhayushhaya sreda i energosnabzhenie. – 2019 - 1. – pp.51-64.
23. Likhackij G.N. Malaya gidroenergetika v Respublike Belarus [website]. - URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/6098/422-425.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Access 27.06.2025).
24. Degtyarev K. S., Sinyugin O. A. Territorialnaya organizaciya vozobnovlyaemoy elektroenergetiki Rossii. Okruzhayushhaya sreda i energosnabzhenie. — 2024. — 1. — pp. 36–50.
25. Malye gidroelektrostancii (MGES) [website]. - URL: <https://energybase.ru/power-plant/small-hydroelectric> (Access 27.06.2025).
26. Associaciya razvitiya vozobnovlyaemoy energetiki (ARVE) [website]. – URL: <https://rreda.ru/industry/imap> (Access 28.06.2025)
27. GIS VIE Rossii MGES i PES [website]. – URL: <https://gisre.ru/gis-objects-map/?type=e-water> (Access 28.06.2025)
28. GES na sajte associacii “Gidroenergetika Rossii” [website]. – URL: <https://www.hydro-power.ru/map> (Access 28.06.2025)

29. Obosnovyivayushhie materialy. Skhema i programma razvitiya elektroenergeticheskix sistem Rossii na 2023–2028 [website]. – URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/future_plan/public_discussion/2023/final/00_public_sipr_ups_2023-28_fin.pdf (Access 28.06.2025)
30. Vozobnovlyаемая энергия. Гидроэлектростанции России. Spravochnik PAO «RusGidro» i Associacii «Gidroenergetika Rossii» sovmestno s Sankt-Peterburgskim politekhnicheskim universitetom Petra Velikogo [website]. – URL: https://vk.com/doc16716709_646454286?hash=jvH3cOlyDnPtRNR6GJZPjmLvHJwUzed530RLbtLZLcg (Access 28.06.2025).
31. Karta GES Rossii [website]. – URL: <https://www.google.ru/maps/d/embed?mid=1Jxg-URtC9alYiKfU-gnvUpmsJ94&ll=46.9463118258339%2C65.01919158291255&z=3> (Access 28.06.2025).
32. Malye gidroelektrostancii [website]. – URL: <https://energoseti.ru/stations/malye-gidro-elektrostancii> (Access 28.06.2025).
33. Atlas resursov vozobnovlyаемой энергии на территории России. Nauch. izdanie T. I. Andreenko T. S. Gabderaxmanova O. V. Danilova et al. — RXTU im. D.I. Mendeleeva Moskva 2015. — 160 pp.
34. Spravochnik po resursam vozobnovlyаемых источников энергии России i mestnym vidam topliva (pokazateli po territoriyam). Ed. P.P. Bezrukikh. M., IAC «Energiya», 2007.
35. Гидроэлектростанции России. Гидропроект – М., 1998.
36. Vodnye resursy i vodnoe xozyajstvo Rossii v 2017 godu (Statisticheskij sbornik) Ed. N.G. Rybalsky, V.A. Omelyanenko, and A.D. Dumnov. – M. NIA-Priroda 2018. – 230 p.
37. Baza dannykh Federalnogo agentstva «Rosvodresursy». [website]. – URL: <https://gis.favr.ru/opendata> (Access 28.06.2025).
38. Leading rivers in Canada based on discharge volume [website]. – URL: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/water-overview/sources/rivers.html#canada> (Access 28.06.2025).
39. Water Sources. Rivers. Government of Canada. [website]. – URL: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/water-overview/sources/rivers.html#canada> (Access 28.06.2025).
40. GlobalEnergyMonitor [website]. – URL: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-hydropower-tracker/tracker-map/> (Access 28.06.2025).
41. Hydro Power Plants in Canada. [website]. – URL: <https://database.earth/energy/power-plants/hydro-power/canada> (Access 28.06.2025).
42. Ontario Power Generation. [website]. – URL: <https://web.archive.org/web/20100827044648/http://www.opg.com/power/OPGmap0309.pdf> (Access 28.06.2025).
43. Newfoundland and Labrador Hydro Bay dEspoir Hydroelectric Generating Facility [website]. – URL: <https://archive.fo/20130101210528/http://www.nlh.nl.ca/HydroWeb/NLHydroWeb.nsf/LookupGeneratingFacilities/Bay%20d'Espoir%20Hydroelectric%20Generating%20Facility?OpenDocument> (Access 28.06.2025).
44. Columbia Power Corporation. Annual Report. 2014. [website]. – URL: <https://web.archive.org/web/20110723012656/http://www.columbiapower.org/content/cpc-final-annual-report-09-10-lowres.pdf> (Access 28.06.2025).
45. Manitoba Hydro (2015) Your Energy Manitoba Hydro-Electric Board 64th Annual Report For the Year Ended March 31 2015 (PDF) Winnipeg Manitoba Hydro p. 93 [website]. – URL: https://web.archive.org/web/20160304113715/https://www.hydro.mb.ca/corporate/ar/pdf/annual_report_2014_15.pdf (Access 28.06.2025).
46. Statistics Canada Electric Power Generating Stations 2004 (Catalog 57-206) Ottawa Statistics Canada pp. 19–50 quoted in Newfoundland and Labrador Hydro (2006) Annual Electric Power Generating Stations Survey (EPGS) [website]. – URL: <https://www.statcan.gc.ca/en/survey/business/2193> (Access 28.06.2025).

47. About Renewable Energy in Canada. [website]. – URL: <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/energy-sources-distribution/renewable-energy/about-renewable-energy-canada/7295> (Access 28.06.2025).
48. Ataev Z.A. Territorialnaya organizaciya lokalnoj energetiki Centralnogo ekonomicheskogo rajona Rossii. Dissertaciya na soiskanie uchyonoj stepeni doktora geograficheskix nauk. Moskva IGRAN 2008.
49. Ataev Z.A. Prostranstvennyj karkas lokalnyx sistem elektroenergetiki (na primere Moskovskoj oblasti). Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya – 2007. – 2. - pp. 84–95.

History, geography, and prospects for development of small-scaled hydropower in Russia

^{1,1} Kirill Degtyarev, ^{1,2} Anna Kuznetsova

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: ¹kir11111@rambler.ru, ²annak6213@yandex.ru

Abstract. The study contains a retrospective analysis of the development of small-scale hydropower in Russia, highlighting several stages from the end of the 19th century to our time, viewing its current state and background for growth. The article presents data on small hydroelectric power plants built earlier and decommissioned, the list of operating small hydroelectric power plants in Russia nowadays, and their territorial distribution. The conclusion based on historical analysis, estimates of the potential of small hydropower and cross-country comparisons is that it is possible and expedient to increase the number of small hydropower plants and their combined capacities by at least 3-4 times in the foreseeable future in most regions of the country. At the same time, the current barriers to the development of small-scale hydropower have been identified, the overcoming of which probably requires additional government support.

Keywords: small-scaled hydropower, regions of Russia, hydropower potential, renewable energy sources, hydropower history, hydropower geography

УДК 911.9:620.92

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-2-52-64

EDN: HXFZDT

Оценка потенциала малых ГЭС для балансирования выработки СЭС в регионах России

Кузнецова Анна Сергеевна [0009-0002-9315-1432]

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

E-mail: annak6213@yandex.ru

Аннотация. Проведено исследование потенциала малых гидроэлектростанций (МГЭС) в компенсации неравномерности генерации электроэнергии солнечными электростанциями (СЭС) в региональных энергосистемах. В качестве объектов анализа выбраны субъекты, в которых функционируют как действующие СЭС, так и МГЭС. На основе расчетов суточных и сезонных колебаний производительности СЭС определена требуемая мощность МГЭС для балансировки неравномерности генерации. Проведен сравнительный анализ между необходимой мощностью МГЭС и их текущей установленной мощностью. Для субъектов, где существующие мощности МГЭС недостаточны для полной компенсации флуктуаций СЭС, выполнена оценка ресурсного потенциала для наращивания генерирующих мощностей малой гидроэнергетики.

Ключевые слова: малые гидроэлектростанции (МГЭС), солнечные электростанции (СЭС), балансировка энергосистем, неравномерность выдачи мощности.

1 Введение

Важной функцией гидроэлектростанций, в том числе малых ГЭС, является их участие в балансировании колебаний выработки энергии станциями, находящимися с ними в одной энергосистеме (чаще всего – региональной энергосистеме). Для этого ГЭС либо снижают свою мощность, перекрывая или снижая поступление водного потока на турбины гидроагрегатов, либо заполняя бассейны суточного (или сезонного) регулирования. Необходимость балансирования производства энергии в энергосистеме возникает, в первую очередь, вследствие колебаний спроса на электроэнергию со стороны потребителей. Известно, что суточный гра-

фик нагрузки (график потребления электроэнергии) характеризуется двумя пиками – в утренние и вечерние часы; и эти пики проявляются как на уровне региональной энергосистемы, так и на уровне отдельных населенных пунктов. Только предприятия, работающие в постоянном режиме имеют примерно постоянный график нагрузки.

В случае, когда в энергосистеме присутствуют солнечные (СЭС) и ветровые (ВЭС) электростанции, помимо колебаний на стороне потребителей, возникают колебания поступления энергии в сеть со стороны производителей. Вариации выработки энергии солнечными и ветровыми станциями являются неизбежными и обусловлены существенно неоднородными по времени приходом солнечной радиации и ветровым режимом (скоростью ветра). В тех случаях, когда мощность солнечных и ветровых станций в региональной энергосистеме становится высокой (15% и более, согласно стандартам, определяющим режимы работы солнечных электростанций), важной задачей является аккумулярование энергии в период избыточной ее генерации и передачи ее в сеть в ночное время или в период ветровых затиший. Использование электрохимических аккумуляторов, мощность которых должна быть сопоставима с мощностью СЭС или ВЭС, в современных условиях оценивается как очень дорогостоящий метод решения задач балансировки энергосистемы. Анализ мощности и производительности МГЭС в сравнении с этими же характеристиками солнечных и ветровых станций, действующих в пределах одной региональной энергосистемы, может дать основу для обоснования еще одной ниши развития для малой гидроэнергетики – балансирование работы СЭС и ВЭС.

В данной работе был предпринят сравнительный анализ производительности солнечных электростанций и МГЭС, причем была поставлена задача сопоставления суммарной производительности малых гидроэлектростанций и СЭС, а также сезонных и внутри-суточных их колебаний в пределах одной региональной энергосистемы. Безусловно, колебания производительности МГЭС также присутствуют в годовом графике их работы, однако эти колебания являются долгопериодными и с определенной долей вероятности хорошо предсказуемыми в отличие от генерации энергии на солнечных станциях (имеются в виду погодные обусловленные изменения приходящей солнечной радиации).

2 Методика расчётов и результаты

Для анализа взяты региональные энергосистемы (РЭС), в состав которых входят как МГЭС, так и СЭС. Это 10 РЭС в границах следующих субъектов: Краснодарский и Ставропольский края, Оренбургская, Свердловская и Волгоградская области, Республики Дагестан, Адыгея, Башкортостан, Чеченская, Алтай. На уровне региональных энергосистем (область, край, республика) определена суммарная мощность СЭС по данным [1] см таблицу 1.

Таблица 1. Установленная мощность СЭС в субъектах РФ с наличием МГЭС.

№ п/п	Название субъекта РФ	Мощность СЭС, МВт*
1	Волгоградская область	120
2	Краснодарский край	46,5
3	Оренбургская область	370
4	Респ. Алтай	120
5	Респ. Башкортостан	104
6	Респ. Дагестан	15
7	Респ. Адыгея	8,9
8	Свердловская область	37,9
9	Ставропольский край	100
10	Чеченская Республика	15

*Примечание: данные только по ОЭС (объединенной энергосистеме), без учета солнечных электростанций местного значения и малой мощности.

При известной мощности станций (СЭС или МГЭС) производство энергии определяется значением коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), который равен отношению реально произведенной энергии к теоретически возможной. В силу сезонной изменчивости природного ресурса – как для СЭС (приходящая солнечная радиация), так и для МГЭС (кинетическая энергия водного потока, изменчивость которой связана с вариациями расхода водного потока в створе), КИУМ обоих типов станций также испытывает сезонные вариации. На основе данных системного оператора ЕЭС России за 2021 г. [2] были определены средние месячные КИУМ солнечных станций и малых гидроэлектростанций (в среднем для всей территории РФ), см таблицу 2.

Таблица 2. КИУМ МГЭС и СЭС по месяцам.

месяцы	КИУМ МГЭС, %	КИУМ СЭС, %
январь	43	5
февраль	44,5	9
март	44	16
апрель	46	18
май	56,5	23
июнь	54	21,5
июль	51	22
август	50	21

месяцы	КИУМ МГЭС, %	КИУМ СЭС, %
сентябрь	48,5	16
октябрь	46	13
ноябрь	46	7
декабрь	45	3,5

Анализ полученных данных показывает, что если производительность малых ГЭС в среднем по России колеблется в достаточно узком диапазоне в течение года (от 43% до 56,5% от максимально возможной), то колебания производительности СЭС варьируют от 3,5 – 5,0% от максимально возможной в зимние месяцы до 22,0 – 23,0% летом. Таким образом, сезонные колебания производительности СЭС потенциально могут быть компенсированы более устойчивой выработкой энергии от МГЭС, однако необходимо сопоставление мощностей обоих типов станций в пределах региональной энергосистемы. Фактические значения средней в каждом месяце мощности СЭС в регионах РФ представлены в таблице 3. В этой таблице приведена суммарная мощность солнечных электростанций в регионах в средние сутки каждого месяца в период солнечного сияния (в дневное время). В ночное время солнечные электростанции не генерируют энергию, поэтому в таблице 3 по сути представлены не только средние мощности, но и перепады мощности в средние сутки каждого месяца (между дневным и ночным временем). Важно оценить возможность компенсации этих перепадов за счет малых гидроэлектростанций в той же региональной энергосистеме.

Таблица 3. Фактические мощности СЭС в средние сутки месяца в дневное время, МВт.

месяц	Волгоградская обл.	Краснодарский край	Оренбургская обл.	Респ. Алтай	Респ. Башкортостан	Респ. Дагестан	Респ. Адыгея	Свердловская обл.	Ставропольский край	Чеченская Респ.
январь	6,0	2,3	18,5	6	5,2	0,8	0,4	1,9	5,0	0,8
февраль	10,8	4,2	33,3	10,8	9,4	1,4	0,8	3,4	9,0	1,4
март	19,2	7,4	59,2	19,2	16,6	2,4	1,4	6,1	16,0	2,4
апрель	21,6	8,4	66,6	21,6	18,7	2,7	1,6	6,8	18,0	2,7
май	27,6	10,7	85,1	27,6	23,9	3,5	2,0	8,7	23,0	3,5

месяц	Чеченская Респ. Ставропольский край	Свердловская обл.	Респ. Адыгея	Респ. Дагестан	Респ. Башкортостан	Респ. Алтай	Оренбургская обл.	Краснодарский край	Волгоградская обл.
июнь	3,2	21,5	8,1	1,9	3,2	22,4	25,8	10,0	25,8
июль	3,3	22,0	8,3	2,0	3,3	22,9	26,4	10,2	26,4
август	3,2	21,0	8,0	1,9	3,2	21,8	25,2	9,8	25,2
сентябрь	2,4	16,0	6,1	1,4	2,4	16,6	19,2	7,4	19,2
октябрь	2,0	13,0	4,9	1,2	2,0	13,5	15,6	6,0	15,6
ноябрь	1,1	7,0	2,7	0,6	1,1	7,3	8,4	3,3	8,4
декабрь	0,5	3,5	1,3	0,3	0,5	3,6	4,2	1,6	4,2

На примере Чеченской Республики можно видеть соотношение средних за каждый месяц фактической мощности СЭС и действующей мощности МГЭС (см рисунок 1).

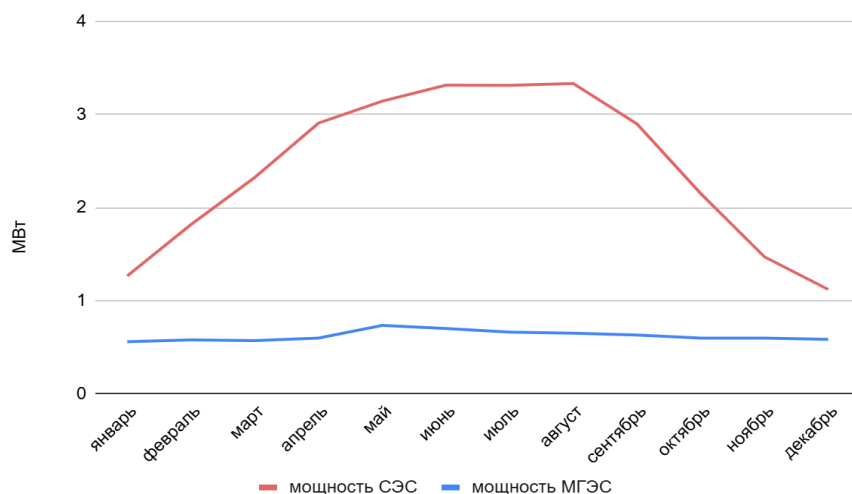


Рис. 1. Средние за месяц мощности действующих СЭС (с учетом КИУМ) и МГЭС в пределах региональной энергосистемы Чеченской Республики.

С учетом КИУМ МГЭС (см. таблицу 2) на основе таблицы 3 была рассчитана мощность малых гидроэлектростанций, которая могла бы компенсировать суточные вариации мощности СЭС по формуле:

$$P_{\text{МГЭС}} = \frac{\text{КИУМ}_{\text{СЭС}}}{\text{КИУМ}_{\text{МГЭС}}} P_{\text{СЭС}},$$

где $P_{\text{СЭС}}$ – установленная мощность СЭС, $P_{\text{МГЭС}}$ – требуемая мощность малых ГЭС. Наибольшая мощность для компенсации необходима в теплое время года (май, июнь, июль, август) (см таблицу 4).

Таблица 4. Необходимая мощность МГЭС для компенсации суточного перепада выдачи мощности СЭС, МВт.

месяц	Волгоградская обл.	Краснодарский край	Оренбургская обл.	Респ. Алтай	Респ. Башкортостан	Респ. Дагестан	Респ. Адыгея	Свердловская обл.	Ставропольский край	Чеченская Респ.
январь	14,0	5,4	43,0	14,0	12,1	1,7	1,0	4,4	11,6	1,7
февраль	24,3	9,4	74,8	24,3	21,0	3,0	1,8	7,7	20,2	3,0
март	43,6	16,9	134,5	43,6	37,8	5,5	3,2	13,8	36,4	5,5
апрель	47,0	18,2	144,8	47,0	40,7	5,9	3,5	14,8	39,1	5,9
май	48,8	18,9	150,6	48,8	42,3	6,1	3,6	15,4	40,7	6,1
июнь	47,8	18,5	147,3	47,8	41,4	6,0	3,5	15,1	39,8	6,0
июль	51,8	20,1	159,6	51,8	44,9	6,5	3,8	16,3	43,1	6,5
август	50,4	19,5	155,4	50,4	43,7	6,3	3,7	15,9	42,0	6,3
сентябрь	39,6	15,3	122,1	39,6	34,3	4,9	2,9	12,5	33,0	4,9
октябрь	33,9	13,1	104,6	33,9	29,4	4,2	2,5	10,7	28,3	4,2
ноябрь	18,3	7,1	56,3	18,3	15,8	2,3	1,4	5,8	15,2	2,3
декабрь	9,3	3,6	28,8	9,3	8,1	1,2	0,7	2,9	7,8	1,2

Если сравнивать требуемую мощность МГЭС для компенсации суточной неравномерности выдачи мощности от СЭС с текущей установленной мощностью

МГЭС в регионах (региональных энергосистемах), то из 10 анализируемых субъектов в половине существующая мощность ниже необходимой (названия таких субъектов выделены жирным, см таблицу 5).

Таблица 5. Существующая установленной мощностью МГЭС и необходимая, МВт.

месяц	Чеченская Респ.	Ставропольский край	Свердловская обл.	Респ. Адыгея	Респ. Дагестан	Респ. Башкортостан	респ. Алтай	Оренбургская обл.	Краснодарский край	Волгоградская обл.
май	6,1	40,7	15,4	3,6	6,1	42,3	48,8	150,6	18,9	48,8
июнь	6,0	39,8	15,1	3,5	6,0	41,4	47,8	147,3	18,5	47,8
июль	6,5	43,1	16,3	3,8	6,5	44,9	51,8	159,6	20,1	51,8
август	6,3	42,0	15,9	3,7	6,3	43,7	50,4	155,4	19,5	50,4
существующая мощность МГЭС, МВт	1,3	98,8	9,2	9,6	94,1	57,1	1,03	22,5	71,1	22

Для 5 субъектов, в которых существующая мощность МГЭС меньше необходимой для компенсации колебаний производительности СЭС, был рассмотрен технический потенциал малой гидроэнергетики в этих регионах по данным [3]. Поскольку технический потенциал рассчитан в виде возможного производства энергии, а не доступной мощности, был проведен пересчет технического потенциала в мощность (см. таблицу 6).

Таблица 6. Сравнение технического потенциала МГЭС в регионе с установленной мощностью МГЭС.

Показатель	Чеченская Респ.	Свердловская обл.	Респ. Алтай	Оренбургская обл.	Волгоградская обл.
существующая мощность МГЭС, кВт	1300	9200	1030	22500	22000*
технический потенциал малой гидроэнергетики, млн.кВтч	712,8	854,48	5202,4	111,33	11,29

Показатель	Волгоградская обл.	Оренбургская обл.	Респ. Алтай	Свердловская обл.	Чеченская Респ.
технический потенциал малой гидроэнергетики с учетом КИУМ МГЭС, кВт	4957	36311	1060502	278695	232485

**В Волгоградской области существующая мощность МГЭС превышает технический потенциал малой гидроэнергетики. Это может быть связано с отличиями от принятого КИУМ и другими факторами, поэтому необходима более детальная оценка для этого субъекта.*

4 из 5 указанных выше субъектов: Свердловская и Оренбургская области и Республики Алтай и Чеченская обладают неиспользованным техническим потенциалом малой гидроэнергетики, что позволяет нарастить установленные мощности МГЭС. В трех из четырех субъектов технический потенциал малой гидроэнергетики достаточен для балансировки колебаний выработки энергии от СЭС: в респ. Алтай необходимо 51,8 МВт МГЭС при техническом потенциале 1060,5 МВт, в Свердловской области необходимо 16,3 МВт при техническом потенциале 278,7 МВт и в Чеченской республике необходимо 6,5 МВт при техническом потенциале 232,5 МВт.

Проведенные оценки были основаны на средних значениях КИУМ СЭС и КИУМ МГЭС для всей территории России по данным [2]. Однако, различное географическое положение приводит к существенным вариациям КИУМ СЭС между различными субъектами России. Для повышения точности полученных результатов оценки по тому же алгоритму была проведена верификация с использованием КИУМ СЭС, которые для всей территории России приведены в ГИС ВИЭ РФ [4] (см рисунок 2) и КИУМ МГЭС, приведенные в Атласе ресурсов возобновляемой энергии на территории России [3], что позволило уточнить оценки, полученные выше.

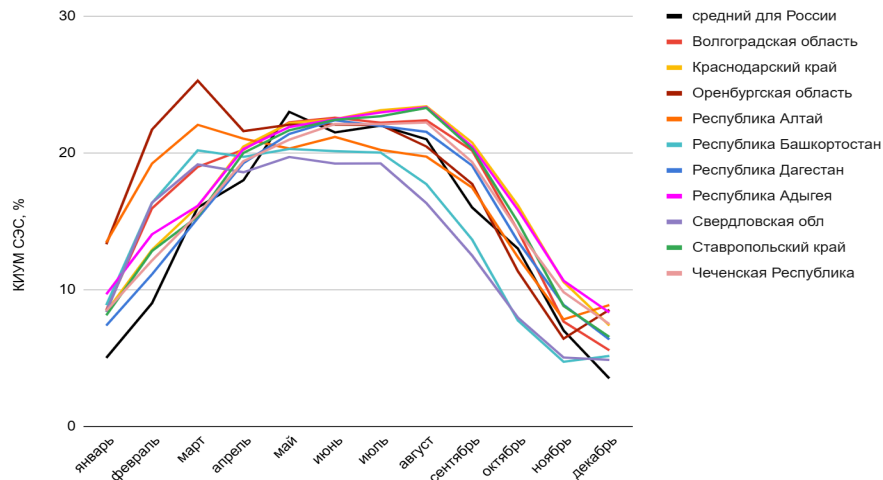


Рис. 2. Графики годового хода КИУМ СЭС, среднего для всей территории России, и для отдельных субъектов. Составлено автором по данным [4].

В ГИС ВИЭ России КИУМ СЭС рассчитан на основе последовательности часовых сумм суммарной солнечной радиации, приходящей на наклонную поверхность (угол равен широте места), за период 2000-2022 гг. В качестве источника данных была использована базы данных NASA Prediction of Worldwide Energy Resources [5]; длительность рядов обеспечивает статистическую достоверность результатов.

Результаты сравнения средних месячных региональных КИУМ СЭС со средними по РФ приведены в таблице 7.

Таблица 7. Отклонение КИУМ СЭС (%) для ряда субъектов России от среднего по стране.

месяц	Волгоградская обл.	Краснодарский край	Оренбургская обл.	Респ. Алтай	Респ. Башкортостан	Респ. Дагестан	Респ. Адыгея	Свердловская обл.	Ставропольский край	Чеченская Респ.
январь	3,5	-0,1	4,9	0,1	-4,6	-1,5	2,3	-1,3	-0,2	0,3
февраль	6,9*	-3,0	8,8	-2,5	-2,9	-5,2	2,9	2,3	-3,5	-0,7
март	3,0	-2,9	9,2	-3,2	-1,9	-5,0	0,9	3,0	-3,8	0,1

месяц	Волгоградская обл.	Краснодарский край	Оренбургская обл.	Респ. Алтай	Респ. Башкортостан	Респ. Дагестан	Респ. Адыгея	Свердловская обл.	Ставропольский край	Чеченская Респ.
апрель	2,2	0,2	1,1	-0,5	-1,3	-0,5	1,0	-1,7	1,4	-0,6
май	-0,8	-0,1	-0,1	-1,7	0,0	1,1	0,5	-2,2	2,0	-0,7
июнь	1,1	-0,1	-0,4	-0,9	-1,0	2,3	0,1	-3,2	3,2	-0,3
июль	0,2	0,9	-1,1	-1,8	-0,2	1,9	1,0	-3,7	3,4	-0,6
август	1,4	1,0	-2,9	-0,7	-2,0	3,8	1,8	-7,0	7,0	-1,1
сентябрь	4,2	0,6	-3,0	-0,3	-3,8	5,4	1,4	-8,0	7,8	-1,0
октябрь	1,3	1,9	-4,8	1,0	-4,6	5,8	2,3	-7,9	7,0	-0,6
ноябрь	0,7	2,9	-4,2	1,4	-3,1	4,2	1,8	-5,6	3,8	1,0
декабрь	2,0	1,8	1,2	0,3	-3,7	1,2	2,0	-3,5	1,7	0,9

* Красным цветом обозначено максимальное превышение регионального КИУМ над средним по РФ; синим – максимальное падение.

Для Волгоградской области и Республики Адыгея наибольшее положительное отклонение КИУМ СЭС от среднего по стране достигается в феврале, для Оренбургской и Свердловской областей и Чеченской Республик – в марте. В остальных субъектах наибольшее превышение среднероссийского КИУМ СЭС в осенние месяцы: сентябрь для Ставропольского края, октябрь – для Республики Дагестан, ноябрь – для Краснодарского края и Республики Алтай. При этом в Республике Башкортостан наибольшее значение КИУМ СЭС (в мае) совпадает со средним по России и ни в один месяц не превышает его.

Наибольшее отрицательное отклонение КИУМ СЭС от среднего по стране, напротив, наблюдается в зимне-весенние месяцы для субъектов с осенним максимальным превышением и в осенние месяцы для субъектов с зимне-весенним максимальным превышением. В целом наибольшее отклонение от среднего по стране КИУМ СЭС наблюдается в сентябре: в Ставропольском крае – положительное, в Свердловской области – отрицательное.

Уточненные КИУМ СЭС для каждого субъекта при расчетах дают необходимую мощность МГЭС для компенсации на 1-3% больше, чем при расчете по среднему для стране КИУМ. Это уточнение не дает сколько-нибудь существенного

изменения в сравнении существующих мощностей МГЭС в субъектах с необходимыми для компенсации вариаций производительности СЭС: из 10 анализируемых субъектов в половине существующая мощность меньше необходимой (названия субъектов выделены жирным, см таблицу 5).

Пространственная визуализация результатов расчетов представлена на рисунке 3.

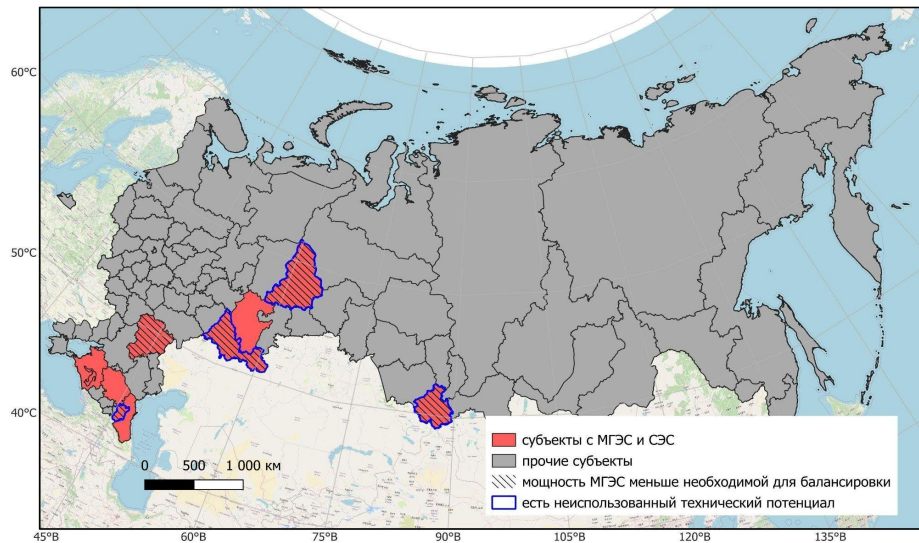


Рис. 3. Пространственное распределение потенциала балансировки суточной неравномерности выдачи мощности СЭС за счет МГЭС.

3 Выводы

МГЭС, действующие в регионах России, обладают потенциалом балансировки колебаний выработки солнечных станций в системе генерации электроэнергии. Из 10 субъектов России, в энергосистемы которых включены и МГЭС, и СЭС, в 5 субъектах (Краснодарский и Ставропольский края, Республики Башкортостан, Дагестан, Адыгея) установленная мощность МГЭС достаточна для балансировки суточной и годовой неравномерности выдачи мощности от СЭС. С учетом технического потенциала малой гидроэнергетики и КИУМ МГЭС в 3 субъектах из оставшихся имеется ресурсно обеспеченная ниша для применения малых ГЭС в целях балансировки работы СЭС: в Свердловской области, в Республиках Алтай и Чеченская.

Литература

1. Ежеквартальный информационный обзор рынка ВИЭ в России IV квартал 2024 [Электронный ресурс]. – URL: https://rreda.ru/upload/iblock/882/5ol0d2x5wvymya7hu4ot1unryz04plkq/202502_RREDA_quartely_report_q_4_2024_2.pdf (Дата обращения: 27.03.2025).
2. Системный оператор единой энергетической системы. Анализ показателей балансов электрической энергии и мощности ЕЭС России за IV квартал 2021 г. Москва. 2022. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2021/ups_balance_analysis_2021q4.pdf (Дата обращения: 19.03.2025).
3. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / Т. И. Андреев, Т. С. Габдрахманова, О. В. Данилова и др. – РХТУ им. Д.И. Менделеева Москва, 2015. – 160 с.
4. ГИС ВИЭ России. Производительность фотоэлектрических модулей. [Электронный ресурс]. – URL: <https://gisre.ru/map-sunres/photovoltaic/> (Дата обращения: 05.03.2025).
5. NASA POWER. Data Access Viewer. [Электронный ресурс]. – URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (Дата обращения: 04.03.2025).

References

1. Quarterly information review of the renewable energy market in Russia IV quarter 2024 [Electronic resource]. – URL: https://rreda.ru/upload/iblock/882/5ol0d2x5wvymya7hu4ot1unryz04plkq/202502_RREDA_quartely_report_q_4_2024_2.pdf (Accessed: 03/27/2025).
2. The system operator of the unified energy system. Analysis of electric energy and capacity balances of the UES of Russia for the fourth quarter of 2021, Moscow. 2022. [Electronic resource]. – URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2021/ups_balance_analysis_2021q4.pdf (Accessed: 03/19/2025).
3. Atlas of Renewable Energy Resources in Russia: scientific publication / T. I. Andrienko, T. S. Gabdrakhmanova, O. V. Danilova, et al. – Mendeleev Russian Technical University, Moscow, 2015. 160 p.
4. GIS RES of Russia. Performance of photovoltaic modules. [Electronic resource]. – URL: <https://gisre.ru/map-sunres/photovoltaic/> (Date of access: 03/05/2025).
5. NASA POWER. Data Access Viewer. [Electronic resource]. – URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (Date of access: 03/04/2025).

Assessment of the potential of small hydroelectric power plants to balance the generation of solar power plants in the regions of Russia

Anna Kuznetsova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: annak6213@yandex.ru

Abstract. A study has been conducted on the potential of small hydroelectric power plants (SHPP) to compensate for the uneven generation of electricity by solar power plants (SPP) in regional energy systems. The subjects in which both the operating SPP and the SHPP operate are selected as the objects of analysis. Based on calculations of daily and seasonal fluctuations in the SPP productivity, the required capacity of the SHPP was determined to balance the unevenness of generation. A comparative analysis was carried out between the required capacity of the SHPP and their current installed capacity. For subjects where the existing capacities of the SHPP are insufficient to fully compensate for fluctuations in the SPP, an assessment of the resource potential for increasing the generating capacities of small hydropower has been carried out.

Keywords: small-scaled hydro power plants (HPP), solar photovoltaic power plants (SPP), energy system balancing, irregularities of electric power output.

УДК 001.891:92(470)

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-2-65-76

EDN: PPNKWV

Мои директорские страсти: размышления о времени, науке и себе: путь академика Р.И. Нигматулина

Нигматулин Роберт Искандрович ^[0000-0002-2454-6046]

Институт Океанологии им. П.П. Ширшова, Российская Академия наук, Москва, Россия

E-mail: nigmar@ocean.ru

Аннотация. Статья подготовлена к празднованию 85-летия академика РАН Роберта Нигматулина 17 июня 2025 года на основе доклада «Мои директорские страсти (о времени и о себе)», прочитанного им 18 июня 2025 года на открытом заседании Учёного совета Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Автор делится личным опытом научного и административного руководства в ведущих академических структурах России, включая Башкирскую академию наук и Институт океанологии, раскрывая сложные механизмы управления наукой, взаимодействия с органами власти и преодоления внутриакадемических конфликтов. Через призму личной судьбы воссоздаётся целая эпоха: от реформ в региональной науке до трансформации отечественной академической системы в постсоветский период. Статья наполнена яркими портретами учёных, философскими размышлениями о природе научного лидерства, ценности научной преемственности и значении общественного признания в судьбе исследователя.

Ключевые слова: Роберт Нигматулин, Башкортостан, научное развитие, образовательная деятельность, академическое руководство, научная политика, Башкирская академия наук, Институт океанологии, мемуары

В 85 лет, завершая очередной солнечный круг, я чувствую необходимость не просто подвести итоги, а в некотором смысле — исповедаться. Это желание близко к христианской традиции: человеку важно быть услышанным, важно не столько рассказать о себе, сколько установить понимание, взгляд в глаза, за которым стоит нечто большее, чем слова. Мне бы хотелось рассказать о трёх важных периодах моей жизни — когда я был руководителем, первым лицом, несущим ответственность. Но начать я хочу не с должностей, а с истоков.

Моя родословная хранит глубокую связь с народным просвещением и служением обществу. Мой дед по матери, Лутфулла Абдулгазизов (1865-1913), умер в

1913 году, когда моя мать ещё не родилась (Рис.1). Он был директором русско-татарской школы в Троицке и до этого возглавлял башкирские школы в деревнях Метелево и Серменево. За заслуги в просвещении был удостоен личного почётного гражданства по указу Императорского Сената. Его имя сохранилось в краевом музее Троицка, как и образ – человек с серебряной медалью на груди, открывавший путь к знанию многим поколениям.



Рис.1. Лутфулла (Абдул)-Газизов (1865-1913)

Судьба семьи после его смерти в 47 лет была непростой. Моя бабушка осталась вдовой с шестью несовершеннолетними детьми (Рис.2). Купцы города Троицка положили капитал на имя его вдовы (моей бабушки), чтобы проценты с капитала соответствовали зарплате деда. Однако война, начавшаяся в 1914 году и революционные события 1917 года уничтожили накопления. Семья выживала благодаря благодарности простых людей: казахи ежегодно приглашали семью в деревню, предоставляя дом и корову. Шестеро детей, в том числе моя мама, выжили и получили образование. Так формировался наш род, в котором служение обществу и знанию было глубоко укоренено.

С отцовской стороны история не менее символична. Мой дед умер в 48 лет, отец только родился. Его воспитал старший брат, будущий профессор Гениятулла Нигматуллин, который, будучи школьным учителем и отцом двоих детей, окончил медицинский факультет Московского университета и стал профессором медицины, основателем Башкирского медицинского университета (Рис.3).

Я рос в семье, где научная и педагогическая традиция была органичной частью жизни (Рис.4). Отец — профессор МВТУ им. Баумана, мать — врач. Образование я получил в двух ведущих вузах страны: МВТУ и МГУ. Учёба в Бауманке дала мне инженерную основу, а страсть к математике привела на мехмат МГУ. Ректор Петровский, в обход всех правил, оформил меня как студента второго вуза — с

второй зачёткой, с вторым студенческим билетом с просьбой посторонним их не показывать. Так я оказался в атмосфере, определившей мою судьбу.



Рис.2. Семья Газизовых (1923 г.). Сидят слева направо: Нигматулла, Бибикамал, Галия, Асма (жена Нигматуллы), стоят: Рауза, Зайнулла, Сара



Рис.3. Старший и младший братья Терегуловы: слева Гиниатулла Нигматуллович (1891-1983) и Искандер Нигматуллович (Нигматулин, 1908-1980)



Рис.4. Супруги Искандер Нигматуллович Нигматуллин (Терегулов, 1908-1980) и Галия Лутфулловна Газизова (Нигматулина, 1914-2005)

После окончания обучения я поступил в Институт механики МГУ, в лабораторию ударных и взрывных процессов. Это был начальный этап моей научной карьеры: механика, волновая динамика, теория ударных волн. С 1965 года — работа с многофазными средами, по совету отца, учитывавшего перспективы атомной энергетики и химических технологий. Здесь я встретил своего великого учителя — Халила Ахмедовича Рахматуллина¹, и вскоре защитил кандидатскую (1967) и докторскую диссертацию (1971).

Ко мне потянулась молодежь, и вскоре мы сформировали научную группу, превратившуюся в мощную лабораторию механики многофазных сред. Модель

¹ Рахматулин Халил Ахмедович. Специалист в области аэродинамики, доктор физико-математических наук (1943 г.), академик Академии наук Узбекской ССР (1947 г.), заслуженный деятель науки и техники Узбекской ССР, РСФСР (1959 г., 1960 г.), Герой Социалистического Труда (1979 г.)

нашей работы предполагала наличие системы микрошефов, которые ежедневно работали с аспирантами, а раз в неделю отчитывались передо мной. Среди учеников были Холин, Ивандаев, Вайнштейн, Хабеев и другие. Мы добились успеха не только в науке, но и в так называемых «социалистических соревнованиях» — наша лаборатория с минимальным финансированием (большинство — аспиранты) оказывалась в числе лучших по результативности.

Я начал читать курс по механике многофазных систем на мехмате МГУ, написал трёхтомную монографию, изданную тиражом в 5000 экземпляров каждый. Эти книги были переведены в США. Сравнивая с современной ситуацией, когда научные издания выходят тиражами по 200 экземпляров, ощущаешь, как изменилась научная культура: раньше читали действительно много, и книги воспринимались как интеллектуальные события.

Особое значение для меня имело не только написание книг, но и личная преемственность учитель-ученик. Я с уважением и благодарностью вспоминаю своих наставников: Х.А. Рахматуллина, А.И. Бунимовича, В.А. Зверева, А.Я. Саганяна, Ю.Г. Павленко, С.С. Григоряна, Л.И. Седова, Г.Г. Черного. Г.Г. Черный назначил меня председателем самой крупной секции Ученого совета — по физико-химической газовой динамике. Это был знак доверия и признания. Г.Г. Черный и С.С. Григорян во многом определили мой опыт руководителя.

Тогда в академической жизни действовали строгие и, как мне кажется, справедливые правила: каждый научный отчет сопровождался публичной презентацией, рецензиями, и только после утверждения секцией Ученого совета допускался к публикациям. Это был настоящий механизм самоочистки и научного отбора. Сейчас подобные процедуры утрачены. А грантовая система — по существу, разрушает организационные основы академической науки. Научный руководитель должен не только «выигрывать гранты», но и создавать школу, отвечать за направление и людей.

Моя международная научная активность началась с трудностями: не пустили в школу НАТО по турбулентности и в программу Фулбрайта в США. Лишь позже, благодаря приглашениям М. Плессета, Н. Зубера, французских коллег, я стал регулярно выступать с пленарными докладами. Эти поездки были важны: не только показать себя, но и увидеть, как организована наука за рубежом.

Моей самой дорогой наградой остаётся премия Ленинского комсомола (1973) — за неё никто не ходатайствовал, её просто присудили за работу. Впоследствии я получил Государственную премию СССР, две премии Правительства РФ, но эта первая награда особенно дорога.

В 1973 году я сознательно вступил в КПСС, осознавая её роль не столько как партии, сколько как государственной структуры, обеспечивавшей управление на всех уровнях. Это не была карьера — это было ощущение долга.

В завершение этой первой части воспоминаний хочу подчеркнуть: жизнь без страстей невозможна. Великие дела совершаются только в состоянии страсти — будь то научная, педагогическая, или даже административная. Именно страсть к знанию, к делу учеников, к науке позволила мне не только строить теорию, но и создавать научные коллективы, воспитывать учеников, влиять на развитие науки

в стране. О директорских страстях — будет позже. Но основа, безусловно, в этой первой части жизни — становлении как учёного, учителя и исследователя.

Во второй части моего рассказа я бы хотел подробнее остановиться на деятельности, которая достаётся малой доле научных работников — руководстве научными организациями. Эта деятельность для меня пришлась в условиях непростой трансформации России и ее науки. Реакция научной интеллигенции на ГКЧП, расстрел парламента и Беловежский заговор свидетельствовали о потере ею общественных и государственных ориентиров в это время.

Началось с переезда в 1986 году в Тюмень по приглашению В.П. Мельникова, ставшего впоследствии академиком и моим другом, и Председателя Сибирского Отделения АН СССР В.А. Коптюга. Для организации в Тюмени академического Института механики многофазных систем, туда со мной поехали мои ученики из Москвы, Уфы и Узбекистана. Поехал со мной и ученик из Вьетнама. Мой ученик А.И. Ивандаев стал ректором Тюменского университета.

Мы создали экспериментальную базу института, кафедру в университете. Меня избрали членом-корреспондентом АН СССР в 1987 году, а четыре года спустя академиком РАН. Я был избран членом обкома КПСС, делегатом XIX партийной конференции КПСС.

Через 7 лет мне настоянию руководства РАН пришлось поехать в Уфу. Там в связи с организацией республиканской академической структуры - Академии наук Республики Башкортостан в 1991 году произошёл раскол среди ученых 11 институтов РАН.

Как известно, после избрания меня председателем Уфимского научного центра Российской академии наук возникло немало трений, связанных с перераспределением долей финансирования между институтами из-за добавления в состав центра двух институтов вызвало недовольство у некоторых директоров. Они приехали в Москву, направились к президенту РАН Ю.С. Осипову. Он их переправил к вице-президенту Н.П. Лавёрову, отвечавшего за региональные научные центры, а он переправил их ко мне. Понимая, что дело будет нелёгкое, я сразу пригласил всех членов президиума УНЦ РАН, чтобы обсуждение прошло гласно и честно. Именно такой подход — коллективное обсуждение, подотчётность и логика фактов — позволил нам, пусть и не сразу, прийти к согласию.

Я не просто сидел в кабинете. Я ездил по институтам с графиками, с таблицами, с анализом многолетней динамики. Убеждал, показывал, разъяснял. Основная моя задача всегда заключалась в том, чтобы не разрушить, а выстроить устойчивую модель — пусть не идеальную, но честную и функциональную. Тем более, что в отличие от прежней системы, где финансирование могло колебаться месяц от месяца, мы ввели стационарные, стабильные механизмы.

Позже президент РБ назначил меня И.О. президента АН РБ с целью ее реорганизации. В АН РБ кроме членов этой академии из институтов УНЦ РАН, университетов и других научных учреждений входили ряд отраслевых институтов. Это был вызов — не только административный, но и идеологический. Мы внесли важные изменения в Устав Академии, в частности, привлекли к выборам академиков не только самих академиков, но и докторов наук. Моя позиция здесь всегда была чёткой: не звание делает учёного, а вклад. Поэтому на выборах должны

участвовать все, кто способен на серьезную научную оценку. Более того, мы привлекали учёных из Казани, Новосибирска, Москвы — с тем, чтобы отбор был по-настоящему научным.

Противостояние, естественно, возникло. Были и публичные нападки, и грубые высказывания, и откровенное давление. Но я всегда действовал через открытый диалог и убеждение. При этом я всегда подчёркивал: АН Республики Башкортостан должна быть не менее российской, чем Уфимский научный центр РАН, а Уфимский научный центр РАН не менее башкортостанским, чем АН Республики Башкортостан.

Когда мне поручили провести реформу Академии, я понимал: это не временная задача. Это миссия. Были попытки саботажа, были звонки ночью, были попытки вмешательства. Но нам удалось реализовать важнейшие перемены. Не без конфликтов, но с результатом. В конечном счете, я вынужден был согласиться баллотироваться на пост президента академии — иначе процесс рисковал быть остановлен. Выборы прошли успешно: лишь 11% проголосовали против. Это была победа ученых Республики.

Один из важнейших вызовов — объединение руководства Уфимского центра РАН и Башкирской академии наук. Я добился, чтобы все заседания президиумов и общих собраний этих академических структур были совместными. Каждый понедельник на этих заседаниях президиумов заслушивался *научный доклад* по плану с приглашением разных специалистов для обсуждения. Это не только усилило координацию, но и способствовало профессиональному росту коллектива.

Мы ввели упрощённые схемы финансирования программ АН РБ: главные институты распределяли средства между соисполнителями. Одну из "лавочек", не занимавшейся научной деятельностью по утвержденным программам, пришлось исключить из Академии. Это вызывало крики, но позволяло сохранить научный фундамент.

Нам удалось построить лабораторный корпус для трех институтов УНЦ РАН, реконструировать оранжерею Ботанического сада УНЦ РАН.

Помимо внутренних дел, мне приходилось участвовать и в важных общественно-политических процессах. Я выступал за государственность башкирского языка в парламенте республики. Это было очень ответственное выступление, где депутаты имели разные точки зрения. Я призвал, что, если мы хотим иметь мир и согласие в многоэтнической республике, мы должны понимать боль каждого этноса и уступать друг другу. Закон был принят почти единогласно. После заседания ко мне подходили люди, пожимали руку и говорили, что не забудут этого.

Поддерживать авторитет научного сообщества в этих условиях было крайне важно. В этом смысле особое значение имели юбилеи выдающихся ученых, внесших неоценимый вклад в становление науки в Башкортостане: академика А.Г.Толстикова, членов-корреспондентов РАН М.Р. Мавлютова и Р.Г. Кузеева. Я публично подчёркивал их вклад, добивался справедливой оценки. Это было важно — для них, для коллектива, для общественного сознания.

Башкирский период описан в моей статье «Мои 13 башкирских лет», опубликованной в Вестнике РАН.

В 2006 году я вернулся в Москву. Вице-президент РАН Н.П. Лаверов меня пригласил и сказал, что мне надо пойти директором Института океанологии. Я это воспринял с удивлением, сказав, что я океана не видел. Н.П. Лаверов: «Вы математик и разберетесь. Институт в кризисе, поэтому нужен человек со стороны, а перед институтом стоят гигантские проблемы».

Все мои коллеги и ученики советовали согласиться. Пришлось согласиться. Я сразу сформировал Ученый совет из 100 человек, в который вошли все научные сотрудники с учеными степенями. Каждую неделю по средам в 14-00 Ученый совет собирался, чтобы выслушать и обсудить *научный доклад*. На этих докладах я учился. Учились все, потому что океанология комплексная наука, в которой работают географы, физики, математики, химики, биологи, геологи, инженеры. А через 2,5 месяца мне пришлось выступить с докладом о достижениях ИО РАН в связи с его 60-летним юбилеем.

На Ученом совете объявил, что ни у кого вакансий нет. Если Вы приведете ко мне для работы в институте даже нобелевского лауреата, я скажу – не мешайте мне работать. Но если приведете студента или аспиранта, то вам не надо искать вакансии, вашей рекомендации будет достаточно. Он будет принят на работу. Это стало важным шагом для омоложения, что сказывается до сих пор. У нас активно защищаются диссертации.

Благодаря встрече с В.В. Путиным на Байкале и помощи помощника Президента РФ А.А. Фурсенко и тогдашнего руководителя только что созданного ФАНО М.М. Котюкова удалось в 7 раз увеличить финансирование флота и экспедиций (Рис.5).



Рис.5. В.В. Путин на Байкале (2008-2009, А.М. Сагалевиц)

Много было и хозяйственных проблем. Напомню только некоторые. Пришлось наладить охрану института, организовать замену электрических щитов, которые изнашивались за 35 лет, а в связи появлением компьютеров и кондиционеров нагрузка на них сильно возросла. Несмотря на опасения, что дорого, построили забор вокруг нашей территории, капитально обновили туалеты, обустроил два малых конференц-зала, организовать столовую.

Пришлось заняться и противопожарной защитой. На каждом Ученом совете предупреждал об опасности потерять рабочее место. Пришлось расчищать заваленные коридоры.

Во всех этих делах мне помогали сотрудники хозяйственных служб во главе с Ю.М. Грачевым и В.А. Пановым, моим помощником Е. В. Скрипкиным. Надежно работала бухгалтерия (Ю.Н. Железнякова), плановый отдел (Н.Г. Асонова), отдел флота (А.В. Соков), секретарь (Л.В. Корастылева).

Объездил все 5 филиалов. Пришлось решать и их проблемы, в частности с Геленджикским филиалом. Пришлось списать оба проржавевших Акванавта (300 тонн) в Геленджике и Астрахани.

Незабвенными в моей памяти остались выдающиеся деятели науки, с которыми я сотрудничал.

Профессор, д.г.н. Александр Васильевич Живаго (1914-2009)

Академик Андрей Сергеевич Монин (1921-2007)

Академик Александр Петрович Лисицын (1923-2020)

Член-корреспондент РАН Глеб Борисович Удинцев (1923-2017)

Д.т.н., Герой Социалистического труда Игорь Евгеньевич Михальцев (1923-2010)

Контр-адмирал Иван Игнатьевич Тынянкин (1923-2017)

Академик Михаил Евгеньевич Виноградов (1927-2007)

Профессор, д.ф.-м.н. Олег Георгиевич Сарохтин (1927-2010)

Профессор, д.ф.-м.н. Григорий Исаакович Баренблатт (1927-2018)

Д.ф.-м.н. Сергей Владимирович Переслегин (1928-2023)

Профессор, д.ф.-м.н. Михаил Николаевич Кошляков (1930-1921)

Профессор, д.г.-м.н. Игорь Оскарович Мурдмаа (1931-2034)

Профессор, д.г.-м.н. Макс Семенович Бараш (1935 – 2020)

Профессор, д.г.-м.н. Вадим Тимофеевич Пака (1936-2024)

Академик Эрик Михайлович Галимов (1936-2020)

Член-корреспондент РАН Сергей Сергеевич Лаппо (1938-2006)

Академик Владимир Евгеньевич Захаров (1939-2023)

Д.б.н. Игорь Алексеевич Мельников (1939-2023)

Профессор д.ф.-м.н. Олег Викторович Копелевич (1940-2020)

К.ф.-м.н. Павел Антонович Стунжас (1940-2020)

К.б.н. Никита Валентович Кучерук (1949-2012)

Профессор д.г.н. Петр Николаевич Макавеев (1955-2020).

Мой 10 летний контракт на посту директора закончился в декабре 2016 года. Через два дня, как оставил пост директора, проснулся и понял, как хорошо жить и не быть директором. Ведь я был 30 лет в должности первого лица научного учреждения.

А это значит каждое утро, как проснешься, думаешь, кого о чем-то просить. Хотя многие думают про директора: «я тоже так могу».

Жалею ли я об этих 30 годах? Нет, не жалею.

Конечно, вместо этих «командных» и государственных дел я сделал бы больше в науке, но ненамного. Ведь среди моих учеников 50 кандидатов наук, 30 из которых стали докторами наук.

У них десятки своих учеников. Они и продолжают заложенные мной идеи и исследования.

Когда пришло время покинуть пост, я ушёл с чувством выполненного долга. За эти годы в научных учреждениях, которыми я руководил, выросли академики, члены-корреспонденты, профессора. Я считаю, что лучшее, что может сделать научный руководитель, — это создать условия для роста других. Я горжусь своими учениками.

Я стал директором ИО РАН в 66,5 лет и ушел с поста в 76,5 лет. Добился, что в ИО РАН 4 академика 5 членов-корреспондентов РАН.

Я выпустил 3 тома «Механика многофазных сред» (Наука и США. 1978-1987), учебник «Механика сплошных сред (кинематика, динамика, термодинамика и статистическая динамика)» (2013), 220 научных статей. Среди них статья в *Science* (2002) и в *Успехах физических наук* (2014).

У меня 13 публикаций по социально-экономической тематике, некоторые из которых опубликованных и в академических журналах, в том числе 3 книги.

Последняя книга «Макроэкономика. Россия и Мир», написанная с братом Б.И. Нигматулиным, на Московском академическом экономическом форуме (05.06.25) три академика дали высочайшую оценку этой работе.

10 лет по 3 месяца в году (2 месяца отпуск + 1 месяц) я работал в зарубежных университетах США, Франции и Великобритании. Помимо научной работы прочитал там курсы лекций по термодинамике (RPI, USA), механике многофазных сред (Jussieu, Paris), турбулентности парожидкостных потоков (Cambridge).

Я имел возможность работать в лучших лабораториях, сотрудничать с ведущими учеными мира. Но всё это время моя душа и дела были здесь.

На более, чем 40 международных конференциях я выступал приглашенным пленарным лектором. В 1995 году в Киото (Япония) мне была оказана честь выступить с «первой пленарной лекцией «Основы, приложения, парадоксы и мифы в механике многофазных сред» на открытии 2-го международного конгресса по механике многофазных потоков. Эта была единственная лекция, которую слушал зал с 800 слушателями вместе с министрами японского правительства. В 1998 г. я был единственным приглашенным пленарным лектором по физической акустике на 16-м Международном акустическом конгрессе в Сिएтле.

Я выступал в ядерных центрах США и России.

Как директор ИО РАН участвовал в заседаниях международного союза директоров океанологических институтов в Циндао (Китай), Бостоне (США), Консепсьоне (Чили), Гонолулу (Гавайи, США), Бермудах (Великобритания). Выступал на конференции «Голубая экономика» в Циндао (Китай, 2009). Каждый год участвовал в океанологических сессиях ЮНЕСКО в Париже.

Я наездился и больше не собираюсь в дальние страны. Я заслужил заниматься тем, чем хочу.

Моя сегодняшняя работа следующая. Я член президиума РАН, член нескольких комиссий РАН и научный руководитель ИО РАН. Вместе с академиком М.В. Флинтом налаживаем взаимодействие с президиумом РАН и руководством Минобрнауки по проблемам научно-исследовательского флота. Кроме того, в ИО РАН я председатель диссертационного совета по физико-математическим и географическим наукам.

По совместительству я заведу кафедрой газовой и волновой динамики мехмата МГУ и заведу всем отделением механики. Эту должность занимали академики Л.И. Седов и Г.Г. Черный. Там же я член диссовета по механике жидкости, газа и плазмы. В МГУ я зам. председателя Аттестационной комиссии. Читаю курс механики сплошной среды на мехмате МГУ и в Сколтехе.

Мне было приятно получить поздравления с 85-летием от моих коллег и друзей. Меня поздравил и Президент В.В. Путин, отметив мою «активную гражданскую позицию». Я также получил поздравления от глав республик Башкортостана и Татарстана.

Я счастлив, что мои дети – сын Тагир и дочь Карима, получив образование в США, где начали успешную карьеру, но вернулись и успешно работают на Родине.

Завершаю свои воспоминания строчками Федора Тютчева

Блажен, кто посетил сей мир
В его минуты роковые.
Его призвали все благие
Как собеседника на пир.

Литература

1. Торжественное заседание Учёного совета Института океанологии, приуроченное к 85-летию юбилею академика Р.И. Нигматулина [Электронный ресурс] // Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 18 июня 2025 г. URL: https://vkvideo.ru/video-1867139_456239610 (дата обращения: 19.06.2025).
2. Нигматулин Р.И. Мои тринадцать башкирских лет / Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 2. С. 159.

References

1. Solemn Meeting of the Academic Council of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Dedicated to the 85th Anniversary of Academician R.I. Nigmatulin [Electronic resource] // P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. June 18, 2025. URL: https://vkvideo.ru/video-1867139_456239610 (accessed: 19.06.2025).
2. Nigmatulin R.I. My thirteen Bashkir years / Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 82. No. 2. P. 159.

My director's passions: reflections on time, science, and self — the path of academician R.I. Nigmatulin

Robert Nigmatulin

P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: nigmar@ocean.ru

Abstract. This article was prepared in celebration of the 85th anniversary of Academician of the Russian Academy of Sciences Robert Nigmatulin (June 17, 2025) and is based on his lecture “My Director’s Passions (On Time and on Myself)”, delivered on June 18, 2025, at an open meeting of the Academic Council of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS. The author shares his personal experience in scientific and administrative leadership within major academic institutions in Russia, including the Bashkir Academy of Sciences and the Institute of Oceanology, elucidating the complex mechanisms of science governance, interactions with state authorities, and resolution of intra-academic conflicts. Through the lens of an individual scientific biography, an entire era is reconstructed — from reforms in regional science to the transformation of the Russian academic system during the post-Soviet period. The article is rich with vivid portraits of scientists, philosophical reflections on the nature of scientific leadership, the value of academic continuity, and the importance of public recognition in the life of a researcher.

Keywords: Robert Nigmatulin, Bashkortostan, scientific development, educational activity, academic leadership, science policy, Bashkir Academy of Sciences, Institute of Oceanology, memoirs.

УДК 504.6:581.55(262.54)

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-2-77-91

EDN: VIQLFW

Ландшафтно-экологический подход к картированию фитобентоса заливов Таманского полуострова

^{1-2, 1} Сушкова Екатерина Григорьевна^[0000-0002-6068-2272],
^{3-4, 2} Афанасьев Дмитрий Фёдорович^[0000-0001-7397-2511],
^{5, 3} Беспалова Людмила Александровна^[0000-0003-0269-4934]

¹Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО», Ростов-на-Дону, 344002, Россия

²ФГОУ ВПО «ЮФУ» Ростов-на-Дону, 344006, Россия

³ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», г. Москва, 105187, Россия

⁴Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, 344003, Россия

⁵ФГОУ ВПО «ЮФУ» Ростов-на-Дону, 344006, Россия

E-mail: ¹ms.tuberosum@mail.ru, ²dafanas@mail.ru,
³lbepalova@sfedu.ru

Аннотация. В статье освещаются результаты подводных ландшафтно-экологических исследований в 2020-2024 гг, проведенных на участках акватории Таманского залива входящего в состав заповедника регионального значения "Запорожско-Таманский". Показана значимость ландшафтных исследований в рамках природоохранной функции заповедника. Представлены результаты в виде ландшафтных профилей и ландшафтных карт фитобентосных сообществ. Произведен расчет запасов макрофитов по типам местности. Картирование донных растительных сообществ ландшафтно-экологическим методом позволяет проводить долгосрочный мониторинг донных природных комплексов и разрабатывать научные обоснования условий природопользования в границах особо охраняемых природных территорий.

Ключевые слова: ландшафты, *Zostera marina*, *Nanozostera noltei*, макрофитобентос, Таманский залив.

1 Введение

Выделение особо охраняемых природных территории (ООПТ) является одним из эффективных механизмов сохранения и восстановления естественного биоразнообразия в границах как наземных, так и морских природных ландшафтов. В тоже время, следует отметить, низкую степень комплексных ландшафтных ис-

следований акватории ОППТ Таманского залива притом, что без них сложно выявить взаимосвязи между компонентами донных природных комплексов (ДПК), а также установить степень их устойчивости к разнообразным факторам воздействия. Акватория Таманского залива входит в состав заповедника регионального значения "Запорожско-Таманский".

Исследование донных ландшафтов современными методами, включающих подводную видеофиксацию, использование спутниковых снимков, для составления ландшафтных карт становится все более актуальным направлением геоэкологии. Несмотря на то что первые упоминания о подводных ландшафтах отмечаются в середине 30-х годов XX в. в работах Л.С. Берга [1,2], лишь с начала 70-х годов в подводном ландшафтоведении определяются основные методы его исследования, картографирования, оценки и классификации [3-5].

В Азовско-Черноморском регионе работы по изучению морских природных комплексов начал К.М. Петров [6] продолжили в Черном море О.Е. Фесюнов, М.Ф. Назаренко [7] в Азовском – Л.А. Беспалова [8], Н.Н. Митина и Е.В. Чуприна [9]. Вследствии пограничного расположения Таманского залива, его изученность с точки зрения ландшафтно-экологического подхода находится на низком уровне и ограничена в основном гидробиологическими, либо гидрологическими работами.

Акватория Таманского залива отличается разнообразием уникальных местообитаний донной растительности, представленной сообществами как высших водных растений, так и водорослей. При этом некоторые виды макрофитов, имеют охранный статус на Федеральном и региональном уровнях. Взморники морской и Нольта (*Zostera marina* L. и *Nanozostera noltei* Hornem.), включены в Красную книгу Республики Крым (2015). Охранный статус зарослей zostеры зафиксирован Европейской директивой (Habitats Directive (92/43/EEC, Annex 1), Natura 2000).

Ландшафтно-экологический подход к оценке состояния фитобентосных сообществ Таманского залива особенно актуален в рамках его охранный статуса с одной стороны и развивающегося сельского хозяйства, и рекреации с другой.

Цель работы – картирование макрофитобентосных сообществ Таманского залива на основе ландшафтно-экологического подхода в современный период.

2 Материалы и методы

Таманский залив глубоко врезан в Таманский полуостров и разделяет его на северную и южную части. Северная часть, ограниченная косой Чушка и Динским полуостровом носит название Динского залива. Южный район залива условно разделяется на кутовую – восточную часть, и открытую к Керченскому проливу, западную. Границей между данными частями является с северного берега коса Рубанова, с южного – коса Маркитанская.

При сравнительно большой площади (384 км²) залив мелководен. Наибольшие глубины отмечаются в юго-западной части залива (5,5 м), преобладают глубины 3–4,5 м. Динский залив, еще более мелководен, здесь максимальные глубины не превышают 2,5 м (средние глубины составляют 1–2 м) [10].

Соленость вод залива колеблется от 13 до 19 ‰. Берега — абразионные и абразионно-оползневые, сложенные рыхлыми глинисто-песчаными породами.

Литотоп ландшафтов представлен в основном глинистыми илами, песками, с примесью раковинного материала. Распределение типов донных осадков подчиняется правилам вертикальной и циркумконтинентальной зональности с постепенным нарастанием доли мелкодисперсных фракций от мелководий к наиболее глубоководным частям залива [11].

Гидродинамический режим его акватории обусловлен поступлением глубинных вод в поверхностные слои в результате водообмена с Черным и Азовским морями [12].

Своеобразие геолого-геоморфологического строения и гидродинамического режима залива обусловили разнообразие сообществ макрофитов, где представлены фитоценозы как высших водных растений, так и водорослей.

Работы в Таманском и Динском заливах проводили на основе стандартных методов подводных ландшафтных исследований (ландшафтного профилирования с детальным описанием точек наблюдения на ключевых участках) с использованием легководолазной техники в 2020-2024 гг. [13,14,15].

В заливе заложены семь трансект (2022-2024 гг.), пересекающих залив от берега до берега (за исключением трансекты №7), а также станции № 20-1-20-5, 21-1-21-5 и 22-1-22-2 (в 2020-2022 гг.) (таб. 1). Карта-схема работ представлена на рисунке 1.

Таблица 1. Координаты крайних точек ландшафтных профилей Таманского и Динского заливов

№ профиля	Наименование населенного пункта	Координаты	
		Северная широта	Восточная долгота
1	п. Сенной	45°28'70"	39°98'87"
	п. Юбилейный	45°32'47"	36°97'92"
2	п. Сенной	45°28'15"	39°97'90"
	п. Волна Революции	45°32'83"	36°95'02"
3	п. Приморский	45°27'10"	39°91'22"
	п. Гаркуша	45°31'65"	36°85'14"
4	п. Береговой	45.35824	36.81385
	п. Батарейка	45.38743	36.81252
5	п. Приморский	45°30'63"	36°81'28"
	отель Антик	45°31'65"	36°85'14"
6	п. Тамань	45°21'91"	36°73'71"
	коса Рубанова	45°30'08"	36°79'94"
7	п. Тамань	45°21'88"	36°72'78"
		45°28'55"	36°72'32"

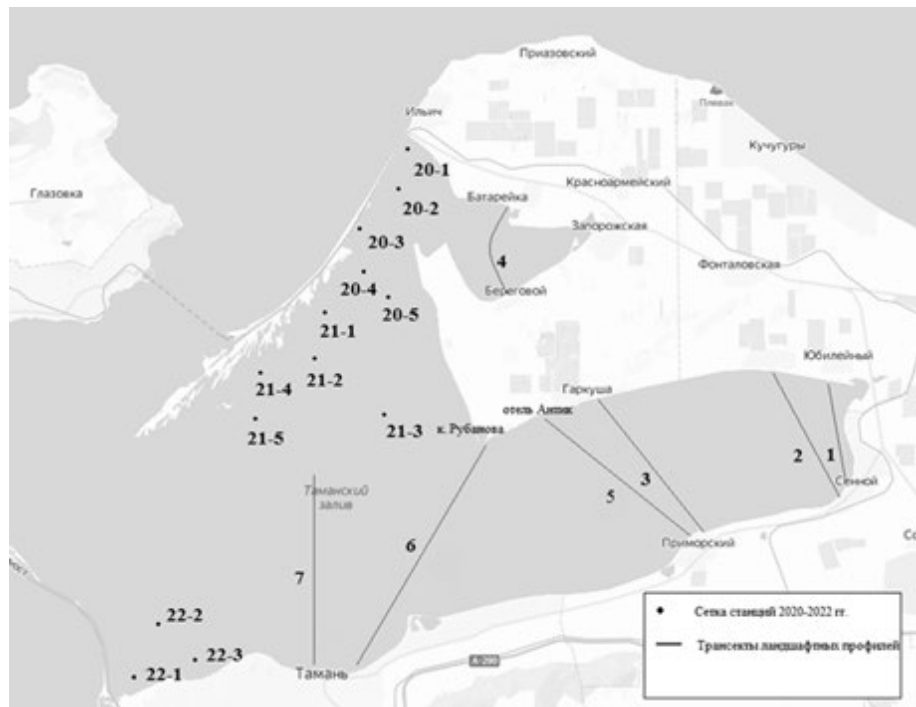


Рис.1. Карта-схема работ в Таманском и Динском заливах

Координаты трансекты ландшафтного профиля и станций определяли при помощи портативного GPS-приемника. Вдоль трансекты, велось сплошное подводное визуальное наблюдение. Глубину определяли фолом, с разметкой шагом 10 см. Общее проективное покрытие (ОПП) определяли при водолазном обследовании усредненной площадки дна 10х10 м.

Состав и структуру донных фитоценозов устанавливали путем отбора проб на глубинах от 0,5 до 4,5 м, в четырех повторностях на участках площадью 0,25 м², с одновременным замером высоты полога. Макрофиты упаковывали в газовые мешки для дальнейшей классификации. В лабораторных условиях определили биомассу и видовой состав макрофитов по стандартной методике, применяемой в морской фитоценологии [16,15]. Выделение фитоценозов проводили согласно доминантной классификации по Калугиной-Гутник [16].

Одновременно на каждой станции описывали донные отложения по методике Безрукова и Лисицина [17] и выполнялся отбор проб грунтов мерным металлическим стаканом емк. 1 дм³. Грунты обрабатывались согласно ГОСТ 12536-79. В работе также были приняты во внимание опубликованные данные о гранулометрическом составе грунтов [11]. За период экспедиционных исследований заложено 68 станций, собрано и обработано 232 пробы.

Данные оформляли графически в виде ландшафтного профиля. В основе ландшафтного профиля лежит батиметрическая кривая, составленная в результате анализа GPS координат и промеров, выполненных при работе на станциях.

На графике условными обозначениями представлены типы донных осадков и массовые виды макрофитов.

При описании компонентов морского дна учитывали мезоформы подводного рельефа, современные донные отложения, тип фитоценозов. Полученные данные послужили основой для выделения однотипных морфологических единиц, на которые экстраполировались характеристики, полученные на ключевых точках описаниях.

Ландшафтное картирование акватории Таманского и Динского заливов осуществляли общепринятыми методами [15] на основе составленных донных профилей и интерпретационных таблиц. Для создания ландшафтной карты использовали программный пакет QGIS версии 3.32.3 и электронную основу навигационной карты Таманского и Динского заливов. Географическую привязку границ фитоценозов и определение их площади осуществляли с помощью программы QGIS и ресурса kosmosnimki.ru.

3 Результаты

Донная поверхность Таманского залива в отсутствие твердых субстратов имеет довольно однородное строение без четких оформленных границ. Типы рельефов дна коррелируют в большей степени с глубиной их простираения. Согласно батиметрической карте Таманского залива описано три типа форм рельефа: мелководная отмель с глубинами до 1,7 м, мелководный подводный склон – 1,7-3,0 м и слабонаклоненная подводная равнина – от 3,0 до 5,5 м (табл.1).

Распределение донных осадков Таманского залива имеет ярко выраженный концентрический характер. По гранулометрическому составу донных отложений выделено три области. Первая зона включает станции на глубинах от 3,5 до 5,5 м локализованных в центральных частях Таманского залива, где преобладающими грунтами выступают алевроитовые и тонкодисперсные пелитовые илы (<0,001мм). Вторая зона содержит группу станций на глубинах от 2,0 до 3,2 м с донными отложениями песчано-илистой фракции (1-0,5 мм) с незначительной долей ракушки. Третья зона мелководья с глубинами порядка 0,3-1,7 м, включала станции, с высоким содержанием крупных фракций песка со значительной долей ракушки (табл.1).

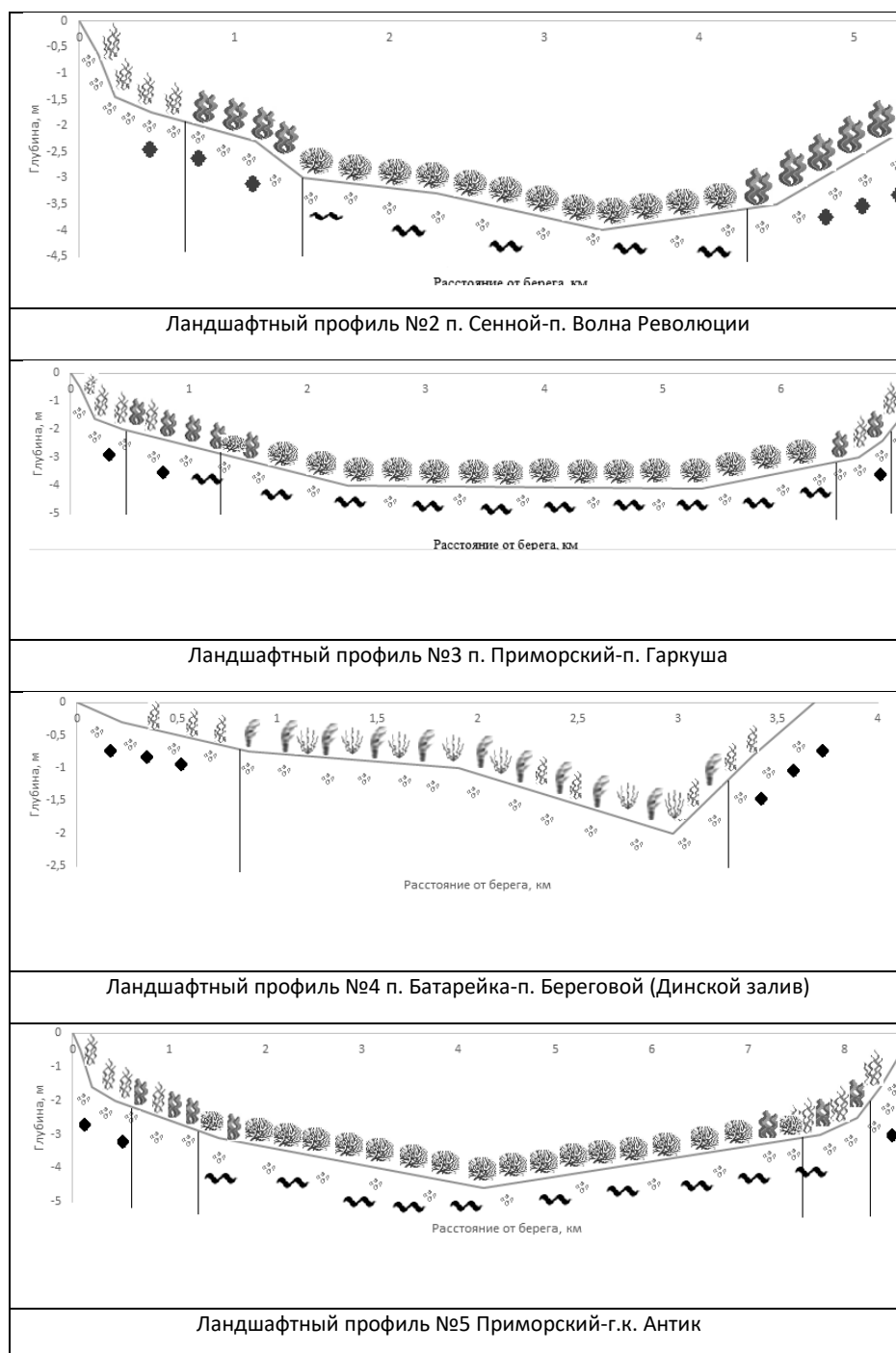
Среди доминирующих видов макрофитов Таманского залива выявлены *Zostera marina*, *Nanozostera noltei*, *Chara baltica* и *Antitamnion plumula*. Отмечен поясных характер в распределении растительных сообществ. Полог фитоценозов имеет сплошной характер в мелководной части и мозаичный начиная с глубин более 2,5 м (табл.1).

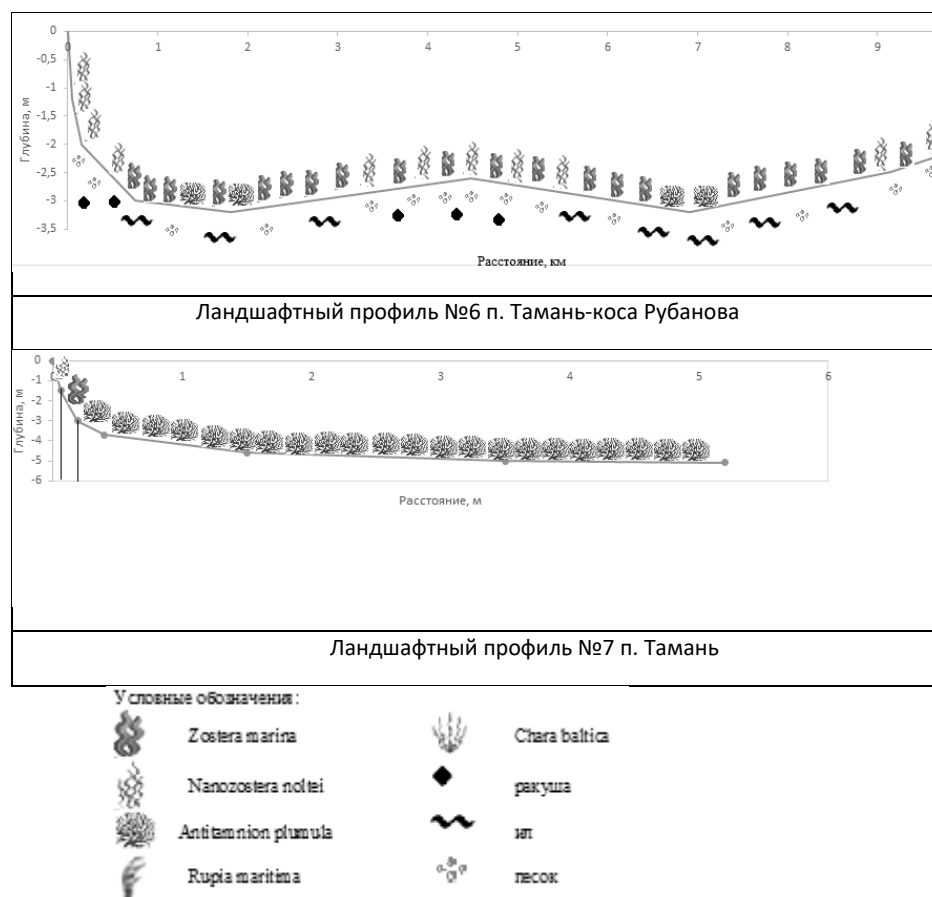
Таблица 2. Распределение доминирующих сообществ относительно глубины распределения и типа донных отложений

Форма рельефа	Тип отложений	Фракция, мм	Глубина, м	Доминирующий вид макрофитов
мелководная отмель	песчанно-илистые с ракушечной	>2,0	0,3-1,7	<i>Nanozostera noltei</i> + <i>Cladophora siwaschensis</i> – <i>Ulva intestinalis</i> - <i>Chaetomorpha linum</i>
			0,3-1,2	<i>Nanozostera noltei</i> + <i>Cladophora siwaschensis</i>
			0,3-1,2	<i>Nanozostera noltei</i> + <i>Zostera marina</i>
мелководный подводный склон	илисто-песчаные	0,05-2,0	1,7-3,0	<i>Zostera marina</i>
			1,2-2,0	<i>Chara baltica</i>
слабонаклоненная подводная равнина	пелитовые илы	<0,05	3,0-5,5	<i>Antitamnion plumula</i>

Анализ полученных данных, позволил построить семь ландшафтных профилей (ЛП №1-7) (рис.2), на которых выделены типы донных природных комплексов (ДПК) с указанием их границ, типы донных отложений и доминирующих видов макрофитов. Результаты обобщения исследований Таманского залива также отражены в ландшафтной карте (табл.3).

Таблица 3. Ландшафтные профили Таманского и Динского заливов





Ландшафтная структура Таманского и Динского заливов включает пять типов донных природных комплексов (ДПК). Эти комплексы характеризуются поясным распространением с размытыми границами. Трансформация ДПК происходит с увеличения глубины, снижением волновой активности и уменьшением освещенности.

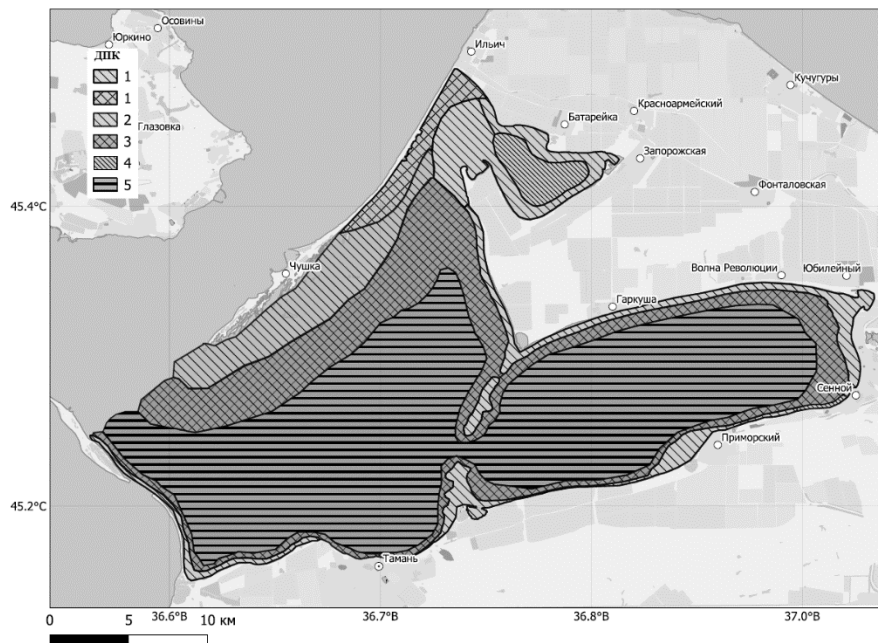


Рис. 3. Распределения донных природных комплексов Таманского и Динского заливов (по данным исследований 2020-2024 гг.).

Мелководная отмель, сложенная песчано-илистыми отложениями с высокой долей крупнозернистых песков (ДПК 1). Донный природный комплекс состоит из двух областей расположенные вдоль всей береговой линии Таманского и Динского заливов. Часть а. – обособлена в Таманском заливе на участках с глубинами от 0,3 до 2,0 м в качестве доминирующего вида макрофитов выступал взморник малый (*Nanozostera noltei*), в качестве сопутствующих видов обнаруживались зеленые водоросли *Cladophora siwaschensis*, *Ulva intestinalis*, *Chaetomorpha linum*. Общее проективное покрытие (ОПП) составляло 80 – 100 %. Общая биомасса - 498,8 г/м² (табл.2)

Часть б. - В западной части акватории Динского залива, прилегающей к косе Чушка на песчанно-илистых отложениях, на глубинах от 0,3 до 1,2 м преобладают фитоценозы взморника малого *Nanozostera noltei* с сопутствующим видом – зеленой водорослью кладофора сивашская (*Cladophora siwaschensis*). ОПП составляло 60 – 70 %. Общая биомасса - 591,59 г/м² (табл.2).

Мелководная отмель, сложенная песчано-илистыми отложениями с примесью ракушки (ДПК 2). Донный природный комплекс описан в юго-западной части акватории на отмелях до 1,3 м. На данном участке доминировало смешанное сообщество *Nanozostera noltei* + *Zostera marina* с отдельными куртинками зеленых водорослей рода *Cladophora*. Местами, довольно редко, встречаются полупогруженные куртины тростника обыкновенного *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. ОПП составляло 80 – 90 %. Общая биомасса – 386,1 г/м² (табл.2).

Мелководный подводный склон, сложенный илисто-песчаными отложениями с включениями раковинного материала (ДПК 3). Донный природный комплекс поясного простирания вдоль всей береговой линии Таманского залива на глубинах 1,7 - 3,0 м, представлен практически чистым сообществом *Z. marina* с общим проективным покрытием ОПП 70 – 100 %. Общая биомасса - 725,3 г/м² (табл.2).

Мелководный подводный склон, сложенный илисто-песчаными отложениями с включениями раковинного материала (ДПК 4). Донный природный комплекс выделен в центральной части Динского залива, со глубинами до 2,0 м, а также в виде узкой полосы вдоль берега в районе п. Сенной на глубинах 1,3-2,0 м. На участках ДПК в качестве доминирующего вида выступает *Chara baltica*, субдоминантами являются *Chondria tenuissima*, *Zannichellia major*, *Ceramium tenuissimum*. ОПП составляет 40-50%. Общая биомасса - 101,8 г/м² (табл.2).

Слабонаклонная подводная равнина, сложенная тонкодисперсными илами (ДПК 5). Донный природный комплекс обособлен в центральной части Таманского залива на глубинах от 3,0 до 5,0 м, с доминированием моновидового сообщества *Antitamnion plumula* который образует сплошные свободнолежащие на грунте сообщества с толщиной слоя до 20-30 см. ОПП составляло 60-100%.

Для каждого донного природного комплекса были рассчитаны общие запасы доминирующих видов макрофитов Таманского и Динского заливов (*Z. marina*, *Nanozostera noltei* и *Antitamnion plumula*) (табл.4).

Таблица 4. Общая характеристика и запасы макрофитов *Zostera marina*, *Nanozostera noltei* и *Antitamnion plumula* в Таманском и Динском заливах

№ ДПК	Площадь, га	Биомасса на г/м ²	Биомасса на т/га	Запасы, т
1а	3800	498,8	4,988	18 952,5
1б	800	591,6	5,916	4 732,7
2	2300	386,1	3,861	8 880,8
3	7500	725,3	7,253	54 395,3
4	732,3	101,8	1,018	745,6
5	18200	678,2	6,782	123 423,3

В результате проведенного исследования были выявлены максимальные запасы макрофитов, составляющие 7,2 т/га, на участках дна с глубинами от 1,7 до 3,0 метров (ДПК 3) с доминирующим фитоценозом *Zostera marina*, который формирует практически полностью сомкнутый полог с ОПП достигающим 100%.

В центральной части залива, на глубинах порядка 3,0-3,2 метра, в структуре донных отложений наблюдалось увеличение содержания фракции тонкодисперсных илов. Параллельно отмечена смена zostеровых ассоциаций на моновидовое сообщество красных водорослей *Antitamnion plumula*. При сохранении показателей запасов на достаточно высоком уровне – около 6,8 т/га (ДПК 5).

Промежуточное положение по запасам сообществ порядка (5,9-3,8 т/га) занимают мелководные участки на глубинах 0,5 – 1,7 м с песчано-ракушечными и песчано-илистыми грунтами (ДПК 1, 2). Фитоценозы мелководной части представлены взморниками с доминированием *Nanozostera noltei* и значительной долей зеленых водорослей.

Минимальные значения запасов характерны для сообществ с доминированием харовых водорослей на глубинах от 0,2 до 1,0 м (1,0 т/га) (ДПК 4).

Проведенные ландшафто-экологические исследования показывают, что распределение и биомасса донной растительности в акватории Таманского залива детерминированы комплексом факторов, включающих не только морфологические характеристики рельефа дна и литологический состав донных осадков, но также глубина их распространения. Комплексный анализ этих взаимосвязей позволяет выявить ключевые механизмы, определяющие структуру и динамику фитоценозов в данном регионе.

Продуктивность фитоценозов взморников Таманского залива традиционна характеризовалась наивысшими значениями [18,19]. Несмотря на то, что моновидовое водорослевое сообщество *Antitamnion plumula* демонстрирует высокие показатели биомассы, лишь незначительно уступая сообществам взморников, следует отметить, что ранее центральную часть залива занимали сообщества зоостеры. Этот факт имеет важное значение для понимания динамики экосистемы во временном контексте.

Возможно трансформация донных фитоценозов в центральных областях залива связана с гидротехническими работами в районе Тузлинской дамбы [19], что привело изменению гидрологического режима и в свою очередь к повышению количества органического вещества в донных отложениях за счет значительного количества отлагающейся мелкодисперсной взвеси, препятствующей поступлению кислорода как в придонный слой вод, а и в донные отложения [19].

4 Заключение

Ландшафтно-экологический подход к исследованию макрофитобентоса Таманского залива позволил провести всесторонний анализ закономерностей пространственного распределения ключевых фитоценозов. В рамках данной работы были выполнены расчеты площадей донных природных комплексов, а также проведена оценка их биомассы и продуктивности.

В контексте современных экологических вызовов и необходимости сохранения биоразнообразия прибрежных экосистем, представляется целесообразным разработать научно обоснованный план функционального зонирования акватории и территории Таманского залива. Данный план должен предусматривать расширение охраняемых участков и оптимизацию рекреационной деятельности с обязательным учетом ценности и уязвимости фитобентосных сообществ.

Следует отметить, что текущий заповедный статус акватории Таманского залива является недостаточным для эффективного сохранения и восстановления особо ценных природных комплексов. Необходимо провести детальный анализ текущего состояния фитобентосных сообществ, выявить ключевые участки, требующие повышенной охраны, и разработать меры по их защите.

Также важно учесть необходимость интеграции научного подхода в процесс принятия управленческих решений, что позволит обеспечить долгосрочную устойчивость экосистем Таманского залива и минимизировать негативное воздействие на них.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность и благодарность зам. заведующего кафедры океанологии ЮФУ Йошпе А.Л., доценту Цыганковой А.Е. за организацию полевых исследований Таманского залива, а также студентам кафедры за помощь в обработке первичного материала в экспедиционных работах, студенту Печкину Р. за активную помощь в отборе проб на акватории залива.

Литература

1. Берг Л.С. География и её положение в ряду других наук // Вопросы страноведения. – 1925. – С.3-17.
2. Берг Л.С. Географические зоны Советского союза. – М.: Географгиз, 1947. – т.1. – С.43-56.
3. Петров К.М. Теоретические основы ландшафтного картирования дна морских мелководий // Картографирование шельфов. – 1974. – С.6-30.
4. Петров К.М. Подводные ландшафты. Теория, методы исследования. – Л.: Нау-ка, 1989. – 128 с.
5. Поярков Б.В., Преображенский Б.В. Принципы картирования экосистем шельфа // Методы комплексного картирования экосистем шельфа. – Владивосток, 1980. – С.7-22.
6. Петров К. М. Подводные ландшафты черноморского побережья Северного Кавказа и Таманского полуострова // Изв. Всес. геогр. общ., 1960. - т. 92, вып. 5.
7. Фесюнов О.Е., Назаренко М.Ф. Геоморфологические и экологические особенности зоны гипоксии северо-западного шельфа Черного моря // Экология моря. – 1991. – вып.37. – С.20-26.
8. Беспалова Л.А. Экологическая диагностика и оценка устойчивости ландшафтной структуры Азовского моря. Ростов-на Дону, 2006.
9. Митина Н.Н., Чуприна Е.В. Подводные ландшафты Черного и Азовского морей: структура, гидроэкология, охрана. М.: Типография Россельхозакадемии, 2012. 320 с.
10. Водно-болотные угодья России. Т. 3: Водно-болотные угодья, внесенные в Перспективный список Рамсарской конвенции. 2000. Под общ. ред. В.Г. Кри-венко. М., Wetlands International Global Series No. 3: 490 с.
11. Донные биоценозы Таманского залива Азовского моря / И. В. Любимов, Г. А. Колючкина, У. В. Симакова, А. Б. Басин // Океанология. – 2023. – Т. 63, № 6. – С. 936-949. – DOI 10.31857/S0030157423060102. – EDN QNBONN.
12. Формирование зон экологического риска в прибрежных акваториях Керчен-ского пролива / К. И. Гуров, Ю. С. Гурова, Н. А. Орехова, С. К. Коновалов // Морской гидрофизический журнал. – 2022. – Т. 38, № 6(228). – С. 637-654. – DOI 10.22449/0233-7584-2022-6-637-654. – EDN MEJENQ.

13. Блинова Е.И., Пронина О.А., Штрик В.А. Методические рекомендации по учету запасов промысловых морских водорослей прибрежной зоны // Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны. Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. М.:Изд-во ВНИРО, 2005. Вып. 3. С. 80–127.
14. Громов В.В. Методика подводных фитоценологических исследований // Гидробиологические исследования северо-восточной части Черного моря. Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ. - С. 69–72.
15. Сушкова, Е. Г. Анализ пространственной структуры распределения фитобентосных сообществ Таманского залива / Е. Г. Сушкова, Д. Ф. Афанасьев, Л. А. Беспалова // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 11. – С. 78-84.
16. Калугина-Гутник А.А. Фитобентос Черного моря. — Киев: Наук. думка, 1975. — 247 с
17. Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. Выпуск 3. Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны. – М.: Изд-во ВНИРО, 2005. – 135 с. 10.17513/use.38336. – EDN BPIDFY.
18. Громов В.В., Шевченко В.Н., Афанасьев Д.Ф. Фитобентос Таманского залива и Керченского пролива // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: Сб. науч. тр. – М.: Национальные рыбные ресурсы, 2002. – С. 170–176.
19. Бирюкова, С. В., Семин В. Л., Громов В. В. Состояние донных сообществ Таманского залива после постройки дамбы Тузла в Керченском проливе // Наука Юга России. – 2016. Т. 12. № 2. С. 53–67.

References

1. Berg L.S. Geography and its position among other sciences // Questions of Geography.– 1925.– pp.3-17.
2. Berg L.S. Geographical zones of the Soviet Union.– М.: Geografiz, 1947.– vol.1. – pp.43-56.
3. Petrov K.M. Theoretical foundations of landscape mapping of the seabed of shallow waters // Mapping of shelves. 1974. pp.6-30.
4. Petrov K.M. Underwater landscapes. Theory and research methods.– L.: Nauka, 1989. 128 p
5. Poyarkov B.V., Preobrazhensky B.V. Principles of mapping shelf ecosystems // Methods of complex mapping of shelf ecosystems. Vladivostok, 1980. pp.7-22.
6. Petrov K. M. Underwater landscapes of the Black Sea coast of the North Caucasus and the Taman Peninsula // Izv. Everywhere. Geographical Society, 1960, vol. 92, issue 5.
7. Fesyunov O.E., Nazarenko M.F. Geomorphological and ecological features of the hypoxia zone of the northwestern shelf of the Black Sea // Ecology of the sea. – 1991.– issue 37.– pp.20-26.

8. Bepalova L.A. Ecological diagnostics and assessment of the stability of the landscape structure of the Sea of Azov. Rostov-on-Don, 2006.
9. Mitina N.N., Chuprina E.V. Underwater landscapes of the Black and Azov Seas: structure, hydroecology, protection. Moscow: Printing House of the Russian Agricultural Academy, 2012. 320 p.
10. Wetlands of Russia. Volume 6. Wetlands of the North Caucasus (under the general editorship of A. L. Mishchenko). Moscow: Wetlands International, 2006. 316 p.
11. Lyubimov G. V., Kolyuchk. G.A., Simakova Y.V., Basina. A.B. Bottom biocenoses of the Taman Bay of the Sea of Azov // *Oceanology*. 2023. Vol. 63, No. 6. pp. 936-949
12. Formation of environmental risk zones in the coastal waters of the Kerch Strait / K. I. Gurov, Yu.S. Gurova, N. A. Orekhova, S. K. Konovalov // *Marine Hydrophysical Journal*. – 2022. – Vol. 38, No. 6(228). – pp. 637-654. – DOI 10.22449/0233-7584-2022-6-637-654. – EDN MEJENQ.
13. Blinova E.I., Pronina O.A., Strik V.A. Methodological recommendations for accounting stocks of commercial seaweed in the coastal zone // *Methods of landscape research and assessment of stocks of benthic invertebrates and algae of the marine coastal zone. Study of ecosystems of fishery reservoirs, collection and processing of data on aquatic biological resources, techniques and technology of their extraction and processing*. Moscow: VNIRO Publishing House, 2005. Issue 3. pp. 80-127.
14. Gromov V.V. Methods of underwater phytocenotic research // *Hydrobiological studies of the northeastern part of the Black Sea*. Rostov-on-Don: Publishing House of the Russian State University of Economics, pp. 69-72.
15. Sushkova E.G., Afanasyevna D.F., Bepalova L.A. Analysis of the spatial structure of the Istobensk distribution community of the Tatar Bay // *2024 Progress of Modern Natural Science*. No. 11, pp. 78-84. <https://doi.org/10.17513/use.38336>.
16. Kalugina-Gutnik A.A. *Phytobenthos of the Black Sea*. — Kiev: Nauk. Dumka, 1975. — 247 p.
17. The study of ecosystems of fisheries reservoirs, the collection and processing of data on aquatic biological resources, the technique and technology of their extraction and processing. Issue 3. *Methods of landscape research and assessment of stocks of benthic invertebrates and algae of the marine coastal zone*. Moscow: This is decreasing—VNIRO, 2005. p. 135.
18. Gromov V.V., Shevchenko V.N., Afanasyev D.F. *Phytobenthos of Taman Bay and Kerch Strait // Problems of fisheries protection of fisheries main reservoirs of the year of the Azov-Black Sea basin: Collection of scientific reports*. Chirping. Moscow: National Resource and Fisheries, 2002. pp. 170-176.
19. Biryukov S. V., V. Semin V.L., Gromov V. V. The state of the bottom communities of the Taman Bay after the construction of the Tuzla dam in the Kerch Strait // *Science of the South of Russia*. - 2016. Vol. 12. No. 2. pp. 53-67.

Landscape-ecological approach to mapping phytobenthos of the Taman peninsula bays

^{1-2,1} Ekaterina Sushkova, ^{3-4,2} Dmitry Afanasyev, ^{5,3} Lyudmila Bespalova

¹ Azov-Black sea branch of “VNIRO” (“AZNIIRKH”), Rostov-on-Don 344002, Russia.

^{2,5} Southern Federal University Rostov-on-Don, 344006, Russia.

³ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, 105187 Russia.

⁴ Don State Technical University, Rostov-on-Don, 344006, Russia.

E-mail: ¹ ms.tuberosum@mail.ru, ² dafanas@mail.ru,
³ lbespalova@sfedu.ru

Abstract. The article highlights the results of underwater landscape and ecological studies in 2020-2024, conducted in the areas of the Taman Bay aquarium, which is part of the Zaporizhsko-Tamansky Nature Reserve of regional significance. The importance of landscape research in the framework of the nature conservation function of the reserve is shown. The results are presented in the form of landscape profiles and landscape maps of phytobenthic communities. Macrophyte stocks have been calculated by type of terrain. The mapping of bottom-dwelling plant communities using the landscape-ecological method allows for long-term monitoring of bottom-dwelling natural complexes and the development of scientific justifications for environmental management conditions within the boundaries of specially protected natural territories.

Keywords: landscapes, *Zostera marina*, *Nanozostera noltei*, acrophytobenthos, Taman Bay.

УДК 621.3:621.22:620.91

DOI: 10.24412/2658-6703-2025-2-92-106

EDN: WXHOKE

Подвесная парусная энергоустановка

^{1,1} Чекарев Константин Владимирович [0000-0002-5140-5142],
^{1,2} Залиханов Алим Михайлович [0000-0002-2540-6045]

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

E-mail: ¹konstantintchekarev@yandex.ru,
²bulungu@yandex.ru

Аннотация. В большинстве действующих ветровых установок преобразование энергии ветрового потока в электроэнергию осуществляется с помощью ветроколеса с горизонтальной осью вращения. Установки большой мощности из-за низкой плотности воздуха имеют большие размеры. Такие установки могут сооружаться только в тех местах, в которых свойства грунта позволяют выдерживать их большой вес, что снижает область их использования. С целью расширения области использования ветроэнергетических установок на те территории, где сооружение установок традиционной конструкции из-за свойств грунтов невозможно, или экономически невыгодно, разрабатываются новые варианты конструкций энергетических установок. В частности, предлагается конструкция парусной энергетической установки наземного базирования, в которой проблема качества грунта снимается. Установка содержит платформы с системой парусов, которые движутся циклически в заданном интервале перемещений перпендикулярно ветровому потоку. Чтобы уменьшить потери мощности, обусловленные большим временным интервалом изменения направления движения платформ, в установках введена система изменения скорости платформ, содержащая пружины, расположенные на концах интервала перемещения. Экспериментальные исследования на макетах платформ показали работоспособность предложенной конструкции установки. На основе полученных результатов была разработана подвесная парусная энергетическая установка, которая позволяет расширить область использования ветроэнергетических установок на горные ущелья, в которых сооружение установок традиционного типа невозможно. На макете разработанной конструкции подвесной парусной энергетической установки были проведены лабораторные исследования с целью определения работоспособности и энергетической эффективности предложенной конструкции энергетической установки. Результаты исследований представлены в данной статье.

Ключевые слова: ветроэнергетика, возобновляемые источники энергии, ветровая установка, парусная энергетическая установка, жесткие паруса.

1 Введение

Использование кинетической энергии ветра в хозяйственной деятельности человека насчитывает много веков. Преобразователи энергии ветра в виде ветроколеса использовались только на суше для совершения работы, а преобразователи ветровой энергии в виде паруса использовались в основном на воде для перемещения транспортных средств. Известны примеры использования парусов для перемещения транспортных средств на суше [1], но это направление развития не получило. В настоящее время перемещение объектов по земле с помощью парусов осуществляется только в спортивных целях. Создана специальная ассоциация, которая проводит соревнования сухопутных парусных яхт, фиксируются рекорды скорости парусных болидов [2,3].

С появлением зеленой энергетики установки с преобразователем энергии в виде ветроколеса стали использоваться для производства электроэнергии. Они устанавливаются на суше, вблизи морского берега и на море. В большинстве действующих ветровых установках преобразование энергии ветрового потока в электроэнергию осуществляется с помощью ветроколеса с горизонтальной осью вращения и соединенного с ним электрогенератора, которые устанавливаются на высокой опоре. В установках большой мощности диаметр ветроколеса может превышать величину 100 метров. Для удержания ветроколеса таких размеров необходима прочная конструкция и соответствующий грунт, чтобы выдерживать большой вес установки и ветровые нагрузки. Однако существует много областей с высоким ветровым потенциалом, в которых, из-за свойств грунта или рельефа местности, сооружать такие установки либо нельзя, либо экономически нецелесообразно. Парусные энергетические установки дают возможность расширить область использования энергии ветрового потока для производства электроэнергии на эти районы.

2 Актуальность исследования и постановка цели

Предлагаются варианты парусных энергетических установок наземного базирования, позволяющих снять проблему качества грунта при их сооружении. Известен вариант конструкции парусной энергетической установки, содержащей платформы, соединенные в замкнутый состав, который движется по радиальному рельсовому пути [4]. На платформах установлена система парусов, которые меняют положение в зависимости от направления ветра и участка пути. Электроэнергия вырабатывается с помощью электрогенераторов, соединенных с колесами платформ. Недостатком предлагаемой конструкции является низкая эффективность преобразования энергии ветрового потока, поскольку на половине пути платформы перемещаются под острым углом к направлению ветра.

Эффективность парусной энергетической установки наземного базирования можно повысить, если состав платформ сделать незамкнутым и изменить характер движения платформ. Предложен вариант парусной энергетической уста-

новки, в которой платформы движутся циклично в заданном интервале перемещений перпендикулярно направлению ветра [5]. Изменение направления движения в конце интервала перемещений в такой установке осуществлялось в результате изменения положения парусов.

Была создана экспериментальная установка для проведения исследований на макетах парусных платформ. При проведении экспериментов осуществлялась проверка функционирования входящих в установку систем и разработка методик определения технических характеристик ветроэнергетической установки. Были проведены эксперименты по определению величины сил, действующих на платформы [6], определению коэффициента эффективности преобразования энергии ветрового потока [7], а также эксперименты по увеличению мощности ветроэнергетической установки наземного базирования [8].

При циклическом движении платформ изменение направления их движения осуществляется за счет сил, действующих на паруса платформ, при этом происходит потеря мощности установки, поскольку платформы должны остановиться, а затем вновь набрать скорость в обратном направлении. Для уменьшения потери мощности при изменении направления движения платформ было разработано устройство, позволившее уменьшить временной интервал изменения скорости платформ при изменении направления их движения. В его состав входят пружины, расположенные на опорах, задающих интервал перемещений платформ [9]. В этом случае остановка платформ происходит за счет сил сжатия пружин, при этом кинетическая энергия платформы переходит в потенциальную энергию сжатой пружины. После остановки платформы набирали скорость за счет силы, действующей со стороны пружин, в результате изменение скорости платформ осуществляется значительно быстрее.

При изменении направления движения платформ с помощью пружинных устройств возникает проблема уменьшения массы платформ для уменьшения их кинетической энергии для того, чтобы снизить нагрузку на пружинные устройства. Уменьшение массы платформ приводит также к увеличению мощности установки, поскольку при этом увеличивается скорость движения парусных платформ. Примером такого способа увеличения скорости парусных объектов может служить парусный болид на колесах, на котором в 2022 году была достигнута рекордная скорость 222 км/ч [10]. На болиде был установлен более эффективный, чем традиционные паруса, жесткий парус, ширина которого у основания была равна 1 м, а высота 10 метров [11].

В процессе решения задачи уменьшения массы парусных платформ энергетической установки, на основе полученного опыта при проведении исследований на макетах парусных платформ, и с учетом технических достижений в области создания жестких парусов, была сформирована идея о том, что можно создать такую систему жестких парусов, которая будет двигаться по направляющей без перемещающего её объекта в виде платформы или болида. В этом случае аэродинамическая сила, действующая на паруса, будет использоваться в основном для выработки электроэнергии. Из опыта проведения экспериментов на макетах парусных платформ следует, что для эффективного использования энергии ветро-

вого потока система жестких парусов должна двигаться циклически, перпендикулярно направлению ветрового потока, при этом изменение углового положения жестких парусов при изменении направления их движения должно производиться автоматически, а изменение скорости системы парусов должно осуществляться с помощью пружинного устройства. Реализация такой энергетической установки будет наиболее простой при неподвижной направляющей. Этот вариант установки можно реализовать только в тех местах, где ветровой поток всегда направлен в двух противоположных направлениях. Такими свойствами обладает ветровой поток в узких горных ущельях [12]. Кроме того, сооружению подобных энергетических установок в горных ущельях способствует тот факт, что горные склоны могут служить опорой для крепления направляющей, по которой перемещается система жестких парусов. С учетом развитой техники строительства подвесных систем предлагаемая парусная энергетическая установка может быть подвесной. Создание подвесных парусных энергетических установок расширит область использования ветроэнергетики на горных ущельях. Таким образом, задачей работы была разработка конструкции подвесной парусной энергетической установки с указанными выше свойствами, создание её макета и проведение на нем лабораторных исследований с целью определения работоспособности разработанной конструкции установки и её энергетической эффективности.

3 Экспериментальная установка, методика проведения экспериментов

Экспериментальная установка включала генератор ветрового потока (ГВП) и макет подвесной парусной энергетической установки. Изображение генератора ветрового потока (ГВП) представлено на Рис.1.



Рис. 1. Генератор ветрового потока.

Он был выполнен в виде двух рядов вытяжных вентиляторов в количестве 13 и 12 штук в нижнем и верхнем ряду соответственно. Вентиляторы были расположенных рядом друг с другом на рейках длиной 2 метра, разнесённых

по вертикали на 8 см. Рейки крепились на двух стойках, высота которых подбиралась экспериментально таким образом, чтобы паруса оказывались в области равномерного распределения скоростей в вертикальной плоскости. График распределения скоростей ветрового потока в вертикальных плоскостях, отстоящих от ГВР на расстоянии 50 см и 70 см, представлен на Рис. 2.

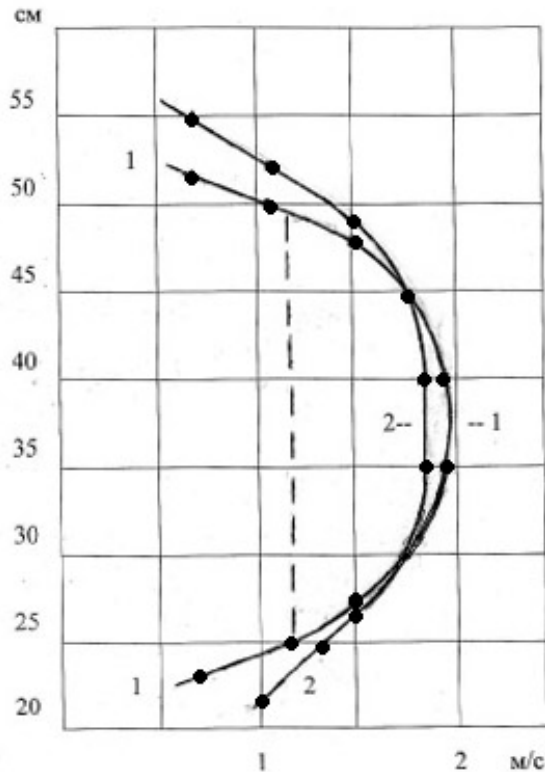


Рис. 2. График распределения скоростей ветрового потока в вертикальных плоскостях на расстоянии 50 и 70 см от генератора ветрового потока (графики на рисунке: 1- 50 см, 2 – 70см.; пунктирная линия – положение пластин системы жестких парусов).

Изображение макета подвесной парусной энергетической установки представлено на Рис.3.



Рис. 3. Макет подвесной парусной энергетической установки.

Система жестких парусов была выполнена в виде прямоугольной рамки размером 26х37 см. В рамку, сделанную из пластикового уголка размером 8х8 мм, были вставлены жесткие паруса в виде 6 пластин размером 7,5х25,5 см, вырезанных из листа пенополистирола толщиной 3 мм. Пластины могли поворачиваться вокруг вертикальной оси, проходящей через их середину. Рамка с жесткими парусами перемещалась по горизонтальной направляющей, закрепленной с двух сторон на вертикальных стойках. В качестве направляющей использовался пластиковый короб сечением 16х25 мм и длиной 2 м. Рамка с жесткими парусами перемещалась по направляющей с помощью системы колес, закрепленных по краям верхней стороны рамки. Схема системы колес, закрепленных на верхней стороне рамки, представлена на Рис.4. Положение низа рамки в вертикальной плоскости, проходящей через направляющую, фиксируется с помощью двух роликов, закрепленных на концах нижней стороны рамки, и лески, натянутой между стоек, к которым крепится направляющая.

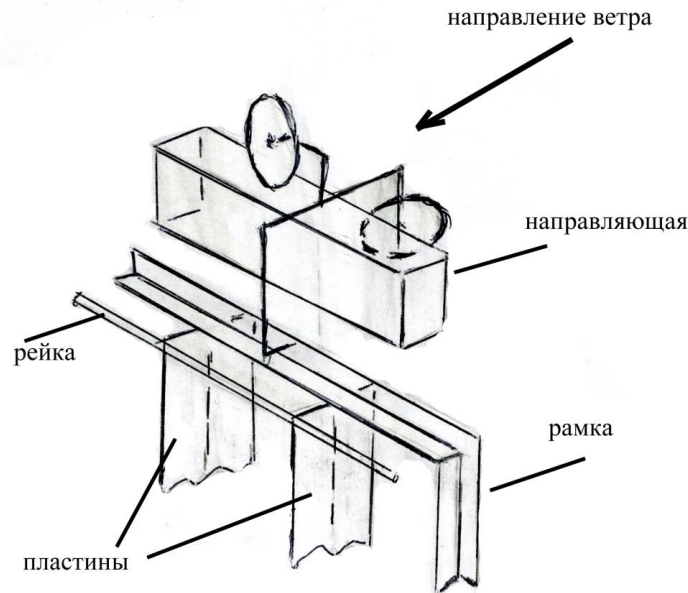


Рис. 4. Схема системы колес, закрепленных на верхней стороне рамки.

При работе генератора ветрового потока ролики на нижней стороне рамки оказываются прижатыми к леске. На направляющей с двух концов были установлены регуляторы интервала перемещений рамки с жесткими парусами, которые определяют величину интервала перемещений. Изображение регулятора интервала перемещений представлено на Рис.5 а). На регуляторе интервала перемещений установлено пружинное устройство (Рис. 5 б)), с помощью которого изменяется скорость рамки при изменении направления её движения, а так же упорное устройство, с помощью которого меняется угловое положение вставленных в рамку пластин. Для одновременного изменения углового положения всех пластин в верхний угол каждой пластины с одной стороны рамки вставлены вертикальные штырьки, на которые надета легкая рейка. При перемещении рейки вперед или назад изменяется угловое положение вставленных в рамку пластин. Под действием воздушного потока рамка движется к одному из регуляторов интервала перемещений. При приближении рамки к регулятору интервала перемещений расположенная на пластинках рейка приходит в контакт с упорным устройством, в результате чего вставленные в рамку полоски поворачиваются на угол 90° . Одновременно с изменением углового положения пластин рамка приходит в контакт с расположенным на регуляторе интервала перемещений пружинным устройством, в результате под действием пружины рамка начинает двигаться в обратную сторону.

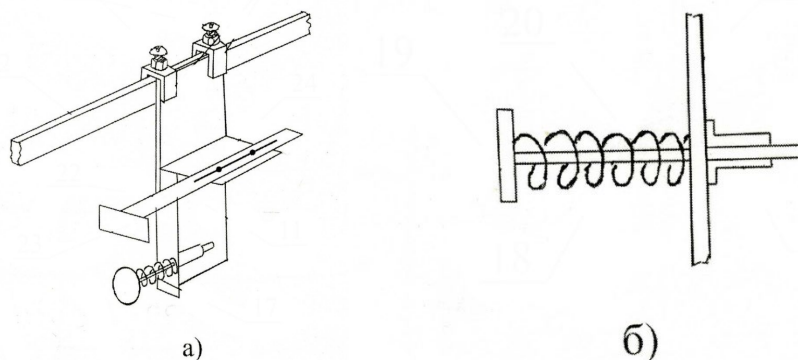


Рис. 5. Регулятор интервала перемещений. (а) – общий вид; б) – пружинное устройство).

При проведении экспериментов движение платформ снималось на видеокамеру. По полученным записям строились графики перемещения платформ в зависимости от времени, по которым определялась их скорость и другие параметры движения платформ.

4 Результаты экспериментов и обсуждение

Было проведено две серии экспериментов. В первой серии исследовалось функционирование разработанной конструкции подвесной парусной энергетической установки при движении одной и двух рамок на разных интервалах перемещений. Во второй серии проводились эксперименты по определению величины аэродинамических сил действующих на жесткие паруса. С учетом полученных значений скорости рамок с жесткими парусами в первой серии экспериментов, нахождение величины аэродинамической силы позволяет определить энергетическую эффективность подвесной парусной энергетической установки.

Эксперименты показали, что предложенная конструкция подвесной парусной энергетической установки работает эффективно. На Рис.6 приведен график перемещений одной рамки в зависимости от времени на интервале 140 см. Как видно из рисунка, скорость рамки после изменения направления движения практически равна скорости до контакта с пружинным устройством.

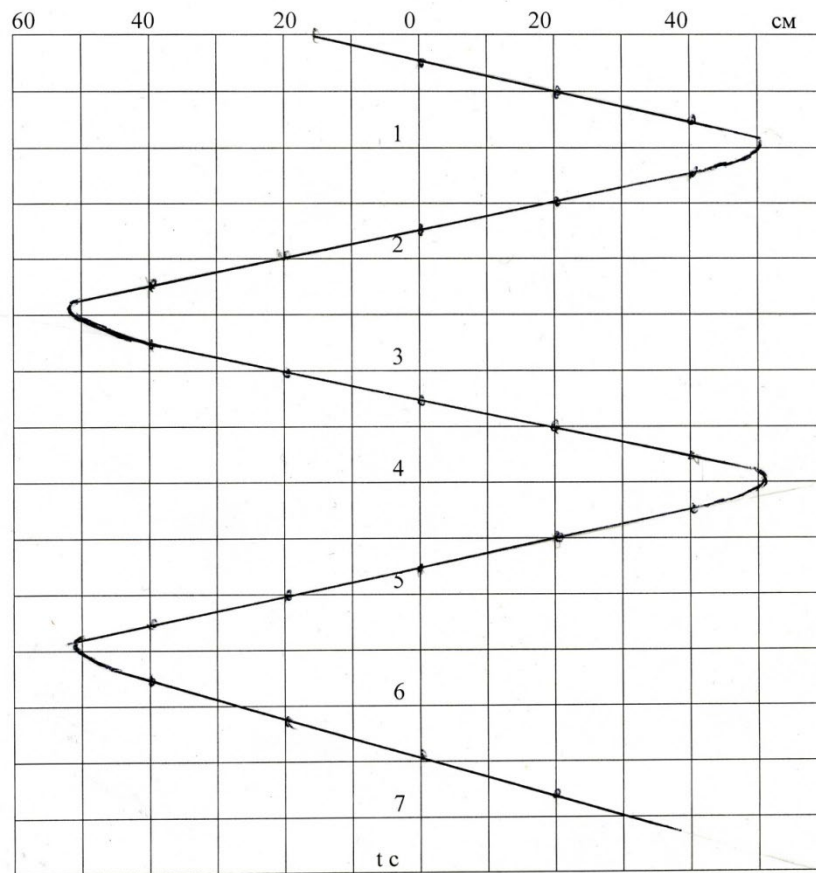


Рис. 6. График перемещений рамки в зависимости от времени на интервале 140 см.

При проведении экспериментов с двумя рамками в конструкцию макета подвесной установки были внесены следующие дополнительные элементы. Для устранения колебаний, которые могут возникнуть между рамками после взаимодействия первой по ходу движения рамки с пружинным устройством, расположенным на регуляторе интервала перемещений, рамки были соединены пружиной с ограничительной нитью, равной длине пружины.

Для того чтобы изменение углового положения пластин второй рамки происходило одновременно с пластинами первой рамки, края соседних пластин двух рамок были соединены нитью, длина которой была равна длине пружины, соединяющей рамки.

Эксперименты с движением двух рамок показали, что предложенная конструкция изменения положения пластин второй рамки работает эффективно. При повороте пластин первой по ходу рамки, соединяющая соседние пластины прочная

нить тянет пластины второй рамки и они поворачиваются на угол 90° одновременно с пластинами первой рамки.

В предварительных экспериментах было замечено, что рамки на разных интервалах перемещений движутся с разной скоростью. Эксперименты с одной рамкой проводились на интервалах перемещений в диапазоне 60-160 см, а эксперименты с двумя рамками проводились на интервалах в диапазоне 100-160 см. В Таблице 1 приведены значения скоростей установившихся циклических движений одной и двух рамок для соответствующих диапазонов перемещений. Символом L в таблице 1 обозначается расстояние между регуляторами интервала перемещений, а символ S означает фактическую величину перемещений рамки в данном диапазоне перемещений.

Таблица 1. Значения величины скорости установившихся циклических движений одной рамки в диапазоне перемещений 60-160 см, и двух рамок в диапазоне перемещений 100- 160 см.

1 рамка			2 рамки		
L , см	S , см	$V_{\text{см/с}}$	L , см	S , см	$V_{\text{см/с}}$
60	23	42			
80	43	62			
100	63	71	100	23	45
120	83	79	120	43	57
140	103	80	140	63	68
160	123	80	160	83	76

На Рис. 7 данные из таблицы 1 представлены в виде графика зависимости скорости установившихся циклических движений одной и двух рамок в зависимости от величины фактических перемещений рамок S . Из графика видно, что зависимость скорости рамок от величины их фактического перемещения является общей для одной и двух рамок. Это дает основание определять оптимальный интервал перемещений любого состава рамок, количество которых определяет мощность установки.

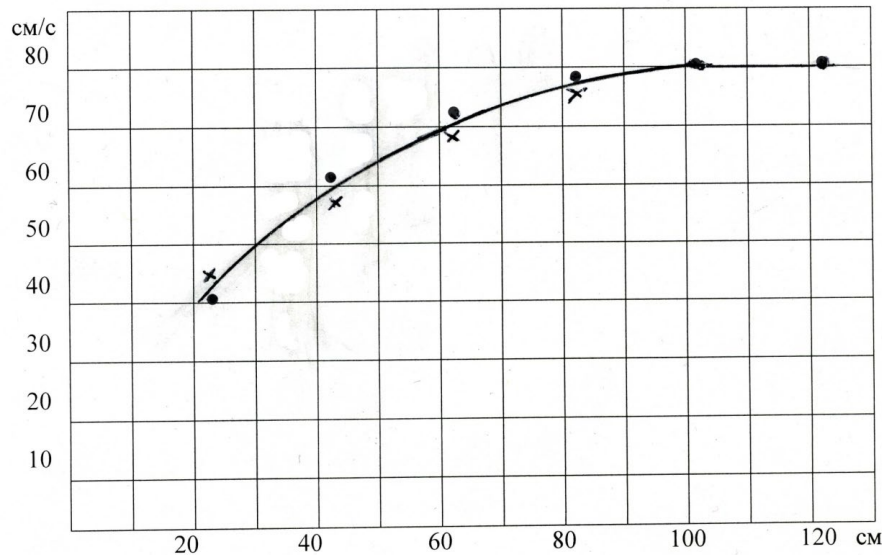


Рис. 7. Скорость движения рамок в зависимости от величины фактических перемещения. (● — одна рамка, X — две рамки.)

Мощность аэродинамической силы F , действующей на систему жестких парусов равна произведению этой силы F на скорость перемещения системы жестких парусов V

$$W = F \times V \quad (1)$$

Зная мощность, развиваемую аэродинамической силой, можно определить энергетическую эффективность подвесной энергетической установки. Величина скорости, развиваемая рамкой с жесткими парусами, была найдена в первой серии экспериментов. Для нахождения аэродинамической силы, действующей на паруса подвесной энергетической установки использовалась методика, с помощью которой определялась величина сил, действующих на платформы с парусами (6). Согласно этой методике для нахождения силы трения, действующей на рамку, к ней нужно прикрепить горизонтальную нить, к которой через блок прикреплен груз. Подбирая величину груза таким образом, чтобы рамка двигалась равномерно с небольшой скоростью, можно определить величину силы трения. В отличие от платформ при работе генератора ветрового потока, действующая на рамку сила трения кроме веса зависит также от прижимной силы, которая действует на паруса рамки со стороны ветрового потока. Суммарная величина силы трения, действующая на рамку, определялась следующим образом. На направляющую подвешивались две рамки, пластины которых были развернуты в разные стороны. При включении генератора ветрового потока рамки оставались неподвижными. Горизонтальная нить крепилась к рамкам по очереди с двух сторон и каждый раз подбирался такой груз, чтобы рамки двигались равномерно с

небольшой скоростью. Сила трения, действующая на рамки при работе генератора ветрового потока, определялась как средний вес грузов, необходимый для движения рамки при креплении нити с двух сторон рамок. Эксперименты показали, что при работе генератора ветрового потока сила трения, действующая на две рамки равна $F_{тр} = 12,1$ гс. Для нахождения величины аэродинамической силы, действующей на пластины двух рамок, их пластины поворачивали в одну сторону на угол 45° и определялась величина груза при включенном генераторе ветрового потока, при котором рамки двигались равномерно с небольшой скоростью. Было найдено, что эта сила равна $15,1$ гс. Для нахождения величины аэродинамических сил, действующих на жесткие паруса двух рамок, нужно к этой величине прибавить величину силы трения, действующей на две рамки при работе генератора ветрового потока. Таким образом, аэродинамическая сила оказывается равной $F_a = 15,1 + 12,1 = 27,2$ гс. Эта сила действует на 12 полос жесткого паруса, следовательно, на одну полосу действует сила $F_{1a} = 2,27$ гс, а на 6 полос одной рамки сила $F_{6a} = 13,59$ гс = $0,136$ н. Максимальная скорость одной рамки равна $V = 80$ см/с = $0,8$ м/с. Подставляя данные значения величины аэродинамической силы и скорости в выражение (1) находим величину мощности, которую может развивать аэродинамическая сила ветрового потока, действующая на систему жестких парусов одной рамки.

$$W_{п} = 0,136 \text{ н} \times 0,8 \text{ м/с} = 0,108 \text{ ватт}$$

Мощность ветрового потока, действующего на систему жестких парусов одной рамки равна

$$W_{в} = mV^2/2 = \rho SV^3/2 \quad (2)$$

где $\rho = 1,22$ кг/м³ - плотность воздуха, $S = 7,5 \times 25,5 \text{ см}^2 \times 0,7 = 0,08 \text{ м}^2$ - площадь 6-ти пластин одной рамки, умноженная на $\cos 45^\circ = 0,7$, а $V = 1,7$ м/с - скорость ветрового потока генератора на расстоянии 50 см от него. Подставляя соответствующие значения в выражение (2) получаем

$$W_{в} = 1,22 \text{ кг/м}^3 \times 0,08 \text{ м}^2 \times (1,7 \text{ м/с})^3 / 2 = 0,231 \text{ ватт}$$

Энергетическая эффективность подвесной парусной энергетической установки определяется отношением

$$K_{эф} = W_{п} / W_{в} = 0,108 \text{ ватт} / 0,231 \text{ ватт} = 0,47$$

Полученная величина коэффициента эффективности соответствует величине коэффициентов эффективности энергетических установок с вертикальной осью вращения.

Кроме указанных выше двух серий экспериментов были также проведены эксперименты по демонстрации возможности макета парусной энергетической установки вырабатывать электроэнергию. Для этого на одной из стоек крепился электрогенератор со шкивом, а на второй стойке крепился шкив. На направляющую помещали две рамки, к которым с двух сторон крепились петля из шнура, проходившая через шкив генератора и шкив на стойке. К выходу электрогенератора подключались 4 светодиода. При перемещении рамок шкив электрогенератора вращался, вырабатывая электроэнергию, при этом горели 2 из 4-х светодиодов, как это видно на Рис. 8. При движении рамок в другую сторону горели два других светодиода.



Рис. 8. Иллюстрация возможности подвесной парусной энергетической установки вырабатывать электроэнергию на примере работы светодиодов.

В процессе экспериментов использовались разные типы электрогенераторов с разными размерами шкивов. Подробное исследование способности подвесной парусной энергетической установки вырабатывать электроэнергию является задачей дальнейших исследований.

5 Выводы

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы. Была разработана конструкция подвесной парусной энергетической установки с системой жестких парусов, выполненных в виде прямоугольной рамки с пластинами, которые могли поворачиваться на угол 90° . Рамка на колесиках могла перемещаться по горизонтальной направляющей циклически в заданном интервале перпендикулярно направлению ветрового потока. На концах направляющей крепились регуляторы интервала перемещений рамки, на которых было установлено пружинное устройство для изменения направлений движения рамки и устройство для автоматического изменения углового положения пластин жестких парусов.

Был изготовлен макет подвесной парусной энергетической установки на котором проводились эксперименты с одной и двумя рамками. Проведенные лабораторные исследования показали работоспособность предложенной конструкции. Была получена временная зависимость скорости системы жестких парусов от интервала её циклических перемещений. Эксперименты с движением по направляющей двух рамок показали возможность регулирования мощности установки. Определена величина сил, действующих на систему парусов и найден коэффициент энергетической эффективности подвесной парусной энергетической установки, равный 0,47. Показана возможность производства электроэнергии на макете подвесной парусной энергетической установки.

Литература

1. Дигаи П. Yacht Russia, № 8 (77), 2015 г. Под парусами по рельсам. URL: https://www.yachtrussia.com/articles/2016/10/21/articles_391.html
2. Всемирная парусная организация // Event Organiser Resource Centre // URL: <https://www.sailing.org/inside-world-sailing/organisation/>
3. Харрис М. ISAF меняет название на World Sailing, // SPORTCEL // 8.12.2015 г. // URL: <https://www.sailingscuttlebutt.com/2015/12/08/isaf-changes-name-to-world-sailing/>
4. Патент № 2125182 РФ, МПК F 03 D 5/04 / Ветроэнергетическая установка; № 96123627/06, заявл. 1996.12.16 / Цыбульников С.И. - заявитель и правообладатель.
5. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования // Окружающая среда и энерговедение. // № 2 (14), 2022. сс.77-90.
6. Чекарев К. В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: определение величины сил, действующих на платформу // Окружающая среда и энерговедение. № 3 (15), 2022, сс. 67-79.
7. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: увеличение мощности // Окружающая среда и энерговедение: № 4 (16), 2022, сс. 59-70.
8. Чекарев К.В., Залиханов А.М. Парусная энергетическая установка наземного базирования: метод прямого измерения сил, действующих на платформу. // Окружающая среда и энерговедение // № 2 (18), 2023, сс. 49-61.
9. Патент № 2806704 РФ, СПК F 03 D 5/04 / Парусная ветроэнергетическая установка; № 2023113130, заявл. 2023.22.05 / Чекарев К.В., Залиханов А.М., Чекарев А.П. - заявители и правообладатели.
10. Press Release of International Federation for Sand and Land Yachting // URL: https://www.fisly.org/newsletter/20221212_Landsailing_Record.pdf
11. Алексей Носаченко. Болид Horonuru разогнался до 222,4 километра в час. // URL: <http://motor.ru/news/horonuku-12-122022.htm>
12. Барри Роджер Г. Погода и климат в горах. Л., Гидрометеиздат, 1984. сс. 143-149.

References

1. Digai P. Pod parusami po relsam. // Yacht Russia, # 8 (77), 2015 // URL: https://www.yachtrussia.com/articles/2016/10/21/articles_391.html/
2. World Sailing Organisation // Event Organiser Resource Centre // <https://www.sailing.org/inside-world-sailing/organisation/>
3. Harris M. ISAF changes name to World Sailing, // SPORTCEL // 8.12.2015 // URL: <https://www.sailingscuttlebutt.com/2015/12/08/isaf-changes-name-to-world-sailing/>
4. Patent RU 2125182 C1 / F 03 D 5/04 / Wind-electric Power Plant /Application: # 96123627/06, 16.12.1996 / Tsybul'nikov S.I. - inventor and proprietor //
5. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. №2 (14), 2022. pp.77-90.
6. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: nakhojdenie velichiny sil, deistviyuschih na platformu // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. №3 (15), 2022. pp.67-79.
7. Chekarev K.V., Zalikhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: uvelichenie moschnosti. // Okruzhayushchaya sreda I energovedenie. № 4 (16) 2022.

8. Chekarev K.V., Zalikhhanov A.M. Parusnaya energeticheskaya ustanovka nazemnogo bazirovaniya: metod priamogo izmerenia sil, deistviushih na platformu. // Okruzhayushchaya sreda i energosnabzhenie. № 2 (18), 2023, pp. 49-61.
9. Patent RU 2806704 C1 / F 03 D 5/04 / Sail wind power unit # 2023113130, 22.05.2023 / Chekarev K.V., Zalikhhanov A.M., Chekarev A.P. - inventors and proprietors //
10. Press Release of International Federation for Sand and Land Yachting // URL: https://www.fisly.org/newsletter/20221212_Landsailing_Record.pdf
11. Aleksey Nosachenko. Bolid Horonuru razognalsya do 222.4 kmh URL: <http://motor.ru/news/horonuku-12-122022.htm>
12. Barry Roger G. Mountain weather and climate. / Leningrad, Gidrometeoizdat. Ss. 143-149.

Hanging sailing power plant

^{1,1} Konstantin Chekarev, ^{1,2} Alim Zalikhhanov

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: ¹ konstantintchekarev@yandex.ru,
³bulungu@yandex.ru

Abstract. In most existing wind turbines, the conversion of wind energy into electricity is carried out using a horizontal-axis wind turbine. Due to the low density of air, large-scale wind turbines are relatively large in size. These turbines can only be built in areas where the soil can support their heavy weight, which limits their availability. To expand the use of wind turbines to areas where traditional designs are not feasible or economically viable, new designs for wind turbines are being developed. In particular, a design of a land-based sailing power plant is proposed, in which the problem of soil quality is eliminated. The plant contains platforms with a system of sails that move cyclically in a predetermined range of movements perpendicular to the wind flow. To reduce power losses due to the large time interval between changes in the direction of movement of the platforms, the systems include a platform speed change system that contains springs located at the ends of the movement interval. Experimental studies on platform models have shown the effectiveness of the proposed design. Based on these results, an overhead sail-powered energy system has been developed, which expands the use of wind energy systems to mountainous areas where traditional systems cannot be installed. Laboratory studies have been conducted on a prototype of the overhead sail-powered energy system to determine its effectiveness and energy efficiency. The research results are presented in this article.

Keywords: windpower, renewable energy sources, wind plant, sailing power plant.