
**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ
ЭНЕРГИИ, ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

**ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ (ОБЗОР)**

© 2023 г. С. В. Киселева^{a, b, *}, Н. В. Лисицкая^b, О. С. Попель^b, Ю. Ю. Рафикова^a,
А. Б. Тарасенко^b, С. Е. Фрид^b, В. П. Шакун^a

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

^bОбъединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

*e-mail: k_sophia_v@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 16.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Представлен краткий обзор геоинформационных систем, предназначенных для сбора, хранения, интеграции, анализа и графической интерпретации пространственно-временных данных по различным технологиям использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в целях принятия обоснованных решений по развитию энергетики на ВИЭ (возобновляемой энергетике). Разработка геоинформационной системы “Возобновляемые источники энергии России” (ГИС “ВИЭ России”) была начата в 2010 г. специалистами географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова и Объединенного института высоких температур РАН. Основной акцент в ней сделан на пространственное отображение ресурсов солнечной и ветровой энергии на территории России. Исходные данные для оценки этих ресурсов формируются преимущественно на базе спутниковых измерений, математического моделирования и верификации результатов наземными метеонаблюдениями. Геоинформационная система содержит также данные о существующих и проектируемых объектах возобновляемой энергетики, научных, образовательных и коммерческих организациях, работающих в этой области. По мере развития геоинформационная система дополнялась сведениями о распределении по территории России ресурсов геотермальной энергии, энергии малых рек, а также оценками удельной производительности установок солнечной и ветровой энергетики, валового и технического потенциалов отходов растениеводства, животноводства, садоводства и виноградарства. В статье кратко описаны методы и подходы, использованные для развития ГИС, в том числе для повышения пространственного разрешения ресурсных данных и расчета технического потенциала возобновляемых источников энергии с учетом достижений в области высоких технологий; сформулированы направления дальнейшего развития и совершенствования отечественной геоинформационной системы.

Ключевые слова: геоинформационная система, возобновляемая энергетика, ресурсы, валовый и технический потенциалы, производительность установок, энергогенерирующие объекты

DOI: 10.56304/S0040363623110073

Геоинформационные системы представляют собой автоматизированные компьютерные системы, обеспечивающие возможность сбора, хранения, интеграции, анализа и графической интерпретации пространственно-временных данных, а также связанной с ними атрибутивной информации о представленных объектах. Первые ГИС начали создаваться в 60-х годах прошлого столетия и по мере развития компьютерных технологий стали применяться в различных областях науки и техники. В последнее время ведется активное вовлечение ГИС-технологий в область возобновляемой энергетики (ВЭ).

Разработанные и представленные в открытом доступе геоинформационные продукты по возобновляемой энергетике по охвату территории можно разделить на локальные, региональные, национальные и глобальные. Анализ текущего состояния и направлений развития ГИС по ВЭ в мире имеет важное практическое значение, в том числе для создания и совершенствования отечественных продуктов в данной области. С использованием ГИС-технологий разрабатываются методики решения различных задач возобновляемой энергетики, среди которых наибольший практический интерес представляют:

оценка ресурсов возобновляемых источников энергии на больших территориях с различной пространственной детализацией;

оптимизация состава, мощности и расположения автономных и сетевых энергоустановок и электрических станций с учетом физико-географических, экологических ограничений, режимов нагрузки и сетевой инфраструктуры;

комплексный анализ различных видов ВИЭ на заданной территории и оптимизация гибридных систем энергоснабжения с учетом текущей генерации энергии, характера потребителей и возможных ограничений для использования установок на возобновляемых источниках энергии.

Целью настоящей работы является анализ основных направлений развития современных ГИС в области возобновляемой энергетики и использования таких технологий для решения актуальных научно-технических задач. Представлено краткое описание ГИС “Возобновляемые источники энергии России” [1], разрабатываемой Научно-исследовательской лабораторией ВИЭ географического факультета МГУ совместно со специалистами Объединенного института высоких температур РАН, и направлений ее дальнейшего развития и совершенствования.

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ И РАЗВИТИЯ ГИС В ОБЛАСТИ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Первоначальными разработчиками атласов (в том числе интерактивных) и ГИС национального масштаба закономерно являлись страны, где возобновляемая энергетика активно развивалась в конце XX в., – это США, Германия, Франция, Дания и др. Безусловным лидером в создании таких ГИС-продуктов является Национальная лаборатория возобновляемой энергии Министерства энергетики США (National Renewable Energy Laboratory – NREL). Состав и форма представления данных в этих ГИС отражают современные тенденции и запросы возобновляемой энергетики. В ГИС NREL представлены оценки ресурсов всех видов ВИЭ для территории США и некоторых регионов мира: потенциальная производительность типовых энергоустановок, информация о размещении действующих энергетических объектов, некоторые важные характеристики территорий: сетевая и земельная инфраструктура, особо охраняемые природные территории (ООПТ); ограничивающие факторы: водные объекты, болота, карсты и др. Региональные модули в составе ГИС NREL имеют наиболее широкий перечень картографических слоев. Большинство разработанных к настоящему времени национальных и глобальных ГИС-продуктов в области ВЭ в той или иной степени имеют аналогичную

структуру и состав карт (интерактивных или статичных). Целый ряд ГИС не только демонстрируют данные и карты о ресурсах ВИЭ, но и содержат простейшие калькуляторы, которые позволяют пользователю получить приблизительные оценки производительности солнечных и ветровых установок.

Стоит отметить последние разработки NREL по представлению в ГИС потенциала ветровой и солнечной энергии в виде “энергетических кривых”. Их создают на основе поэтапного и детального анализа природных ресурсов и технического потенциала (потенциальной удельной производительности станций на ВИЭ), ограничений, приведенной стоимости энергии (LCOE) для конкретной территории. Результат многофакторного картографического анализа представляется в виде графиков зависимости LCOE от установленной мощности для конкретной территории. Такой метод моделирования, с одной стороны, позволяет не перегружать конечного пользователя информацией, с другой – не прозрачен и требует понимания методики моделирования. NREL предлагает использовать свои наработки в виде готовых программных инструментов (например, Cost of Energy Mapping Tool [2]) и предоставляет примеры работы таких инструментов для стран Юго-Восточной Азии.

В 2013 г. Международным агентством по возобновляемой энергии (International Renewable Energy Agency – IRENA) была начата разработка проекта по созданию Глобального атласа ресурсов ВИЭ [3]. Одной из главных задач проекта является получение на основе Google Maps региональных интерактивных карт ресурсных характеристик ветровой, солнечной, геотермальной, приливной энергии и энергии биомассы с учетом ограничивающих их использование факторов. При этом пространственная сетка данных достигает для некоторых регионов 100 м (по ветровой энергии). Представлены инфраструктурные характеристики территорий: электрогенерирующие станции возобновляемой и традиционной энергетики, электрические сети, подстанции, границы регионов, метеорологические станции, осуществляющие измерения значимых характеристик, ООПТ и др. В перечень картографических слоев включены краткие комментарии о пространственном разрешении, источниках данных и связанных ресурсах, а при обращении к конкретной географической точке пользователь получает количественное значение ресурса для этой точки. В 2020–2021 гг. проект разросся до отдельных глобальных атласов по каждому виду энергии.

В открытом доступе в сети Интернет представлены Глобальный солнечный атлас (Global Solar Atlas) и Глобальный ветровой атлас (Global Wind Atlas) с пространственным разрешением данных

3 × 3 и 4 × 4 км соответственно. Сведения для Глобального солнечного атласа и методики оценки энергопотенциалов формируются компанией Solargis [4] – одним из поставщиков информационных данных, картографической и программной продукции для проведения оценок ресурсов солнечной энергии. Для интерактивных картографических слоев в Глобальном ветровом атласе используются метеоданные реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочного прогноза погоды [5]. Реанализ (или восстановление) метеорологических полей представляет собой модельные поля метеорологических величин в узлах регулярной пространственной сетки, покрывающей всю поверхность Земли с временным охватом до середины XX в. и ранее. Реанализы формируются ведущими метеорологическими центрами мира на основе полных комплектов доступных к моменту расчетов данных наблюдений с различных платформ (наземные наблюдения, спутниковые и т.д.). В качестве топографической основы в атласе включены открытые векторные наборы картографических материалов Open Street Map (OSM) [6], карты Bing (Microsoft Corporation), космические снимки компании Earthstar Geographics SIO. Интерактивная составляющая карт обеспечена использованием библиотеки Leaflet Java [7].

Отдельные страны и регионы активно разрабатывают и поддерживают собственные национальные ГИС в сфере возобновляемой энергетики. Большинство таких продуктов ориентированы в первую очередь на оценку ресурсов, но многие проекты ограничиваются представлением информации о действующих объектах возобновляемой энергетики и средних многолетних данных наземных наблюдений по характеристикам ресурсов (солнечное излучение, скорость ветра, расходы в створах рек и др.). Иногда детальность отображения информации доходит до отдельных строений, что позволяет оценить технико-экономические показатели небольших (автономных или сетевых) ветровых или солнечных энергоустановок. Такая подробность обусловлена ориентацией этих продуктов на широкое публичное использование (коммерческое и свободное), причем зачастую их можно скорее отнести не к картографическим произведениям, а к калькуляторам, в которых представлены пространственно привязанные данные о ресурсах ВИЭ.

Создание ГИС по биоэнергетике характерно для стран, где имеется опыт реализации крупных проектов именно в этой сфере. Информационные системы такого вида отражают характеристики источников отходов: производственных и сельскохозяйственных предприятий, полигонов твердых коммунальных отходов и др. Слои интерактивных карт обычно дифференцированы по видам отходов. Атрибутивные таблицы содержат в себе информацию о типах, объемах, качестве,

стоимости отходов, распределенных по временным диапазонам (по сезонам, месяцам и т.п.). Инструментарий данного вида ГИС позволяет производить экономические, логистические и экологические оценки (например, ГИС биоэнергетики Ирландии [8]). Одним из актуальных направлений исследований является разработка инструментов геоинформационного моделирования производительности объектов биоэнергетики. Примером является “Биоэнергетический симулятор” (Bioenergy Simulator) [9], созданный в рамках упомянутого выше проекта Глобального атласа ресурсов ВИЭ IRENA. Инструмент позволяет для выбранной пользователем территории определять возможную выработку тепловой, электрической энергии или производство топлив различных видов в зависимости от заданного типа ресурса (отходы или специально выращенные культуры) и технологии его переработки. При этом в модели учитываются географические и климатические особенности территории.

Важно рассмотреть те направления исследований в сфере ВЭ, которые предусматривают, с одной стороны, дальнейшее развитие методов пространственного анализа характеристик ВИЭ, а с другой – использование созданных ГИС для широкого спектра задач возобновляемой энергетики. Можно отметить следующие направления, которые зачастую логически связаны:

оценки ресурсов и энергопотенциалов различных видов ВИЭ, выполняемые на детальном региональном уровне, с использованием ГИС-инструментов, с учетом характеристик современных технологий и доступности ресурсов, которые зависят от физико-географических и инфраструктурных особенностей местности [10, 11]. Наиболее сложной представляется оценка доступности отходов лесного комплекса в силу необходимости учитывать многие физико-географические, технические и экономические факторы. Так, в [12] оценивается энергопотенциал древесной биомассы в итальянских Альпах с учетом технических и логистических возможностей его использования;

разработка комплексных ГИС, в которых представлены как ресурсы ВИЭ, так и пространственное распределение различных факторов, ограничивающих их использование. Например, в [13] и [14] приведены геоинформационные системы, отражающие пространственное распределение геотермальных ресурсов и ограничений в использовании геотермальных электростанций и тепловых насосов в Испании и Эквадоре соответственно. В [15] описана покрывающая территорию Чили ГИС, разработанная для учета ограничений на строительство гидро- и фотоэлектрических станций со стороны сельского хозяйства;

определение на основе ГИС-ресурсов оптимальных мест расположения станций возобнов-

ляемой энергетики. Это направление особенно актуально для энергетического использования органических отходов, для которых транспортировка является одной из значимых статей расходов [16–18]. Сюда же относятся и работы по комплексной оценке ресурсов и потенциальной производительности станций на различных ВИЭ с учетом ограничений (землепользование, ООПТ, электросетевая и дорожная инфраструктура) в целях проектирования гибридных автономных электростанций на заданной территории [19–21];

анализ возможностей энергоснабжения потребителей с заданной степенью гарантированности при известных территориальном распределении и мощности действующих электростанций и энергопотребителей, а также ресурсов ВИЭ, представленных в картографических слоях ГИС [22, 23];

разработка на основе ГИС-инструментов систем поддержки решений по пространственному планированию станций энергоснабжения на ВИЭ [24]. При этом развиваются мультикритериальные системы поддержки принятия решений (Multiple-Criteria Decision-Making – MCDM) на базе нечеткой логики в отсутствие исчерпывающих исходных данных [25, 26]. Так, в [27] на основе анализа экспертных заключений установлена значимость десяти критериев, которые в дальнейшем использовались для реализации аналитического иерархического процесса в целях определения пригодности земель для размещения солнечных электростанций. Анализ территориального распределения земель с соответствующим набором значений этих критериев осуществлялся с помощью ГИС-инструментов. Аналогичный подход для условий Эквадора описан в [28], где также применены MCDM в комбинации с инструментами ГИС. В этом направлении представлены исследования не только наиболее широко используемых ветровых и солнечных фотоэлектрических станций, но и систем солнечного теплоснабжения крупных потребителей, в том числе вне централизованных сетей [29, 30]. Результаты таких работ обычно отображаются в виде интерактивных карт с развитым интерфейсом, позволяющим определить не только пригодность территорий для размещения станций, но и потенциальную выработку энергии, стоимостные показатели проектов при различных технических характеристиках оборудования;

исследование новых ниш потребления энергии от возобновляемых источников (производство “зеленого” водорода, развитие электромобильного транспорта и др.). Например, в [31] на основе ГИС-методов и модели спроса/предложения электроэнергии исследовалась возможность полного обеспечения структуры зарядных станций Австралии для электромобилей энергией от ВИЭ. Определены необходимые мощности гене-

рации, а также себестоимость энергии. В [32, 33] с использованием ГИС, отображающей пространственное распределение ресурсов воды, солнечной энергии и дорожной инфраструктуры, проведен поиск оптимальных мест для производства водорода методом электролиза из избыточной электрической энергии солнечных станций.

Почти все отмеченные направления, по сути, нацелены на решение одной комплексной задачи – планирование развития энергетики на возобновляемых источниках. Таким образом, инструменты ГИС широко используются не только для оценки ресурсов ВИЭ, но и для более детального планирования развития возобновляемой энергетики, включая аспекты, связанные с ее взаимодействием с потребителем, централизованными сетями, электротранспортом, водородными системами. Отображение информации в привязке к конкретной географической точке или местности, возможность использования одновременно нескольких картографических слоев позволяют адекватно оценить различные ограничения на размещение объектов возобновляемой энергетики, обеспечить обоснованное принятие решений. Часто картографическая информация дополняется аналитическими инструментами, такими как системы оценки удельной производительности станций и установок с детализацией во времени, приведенной стоимости энергии и др.

ГИС “ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ РОССИИ”: СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНАЛ

Развитие экологически чистой возобновляемой энергетики как в районах централизованного, так и в зонах автономного энергоснабжения потребителей представляется одним из приоритетных направлений реализации Стратегии научно-технологического развития [34] и Энергетической стратегии России [35]. При этом актуальной задачей является создание отечественной платформы, содержащей исходные данные и методики расчета для оценки потенциальной производительности объектов возобновляемой энергетики с учетом ресурсного потенциала и факторов, ограничивающих их размещение, в том числе инфраструктурных и экологических. Разработки в данном направлении в России были начаты в 2010–2012 гг. в МГУ им. М.В. Ломоносова (географический факультет) и Объединенном институте высоких температур РАН. В качестве начального шага были выполнены сбор, обобщение и представление в виде баз данных спутниковой информации по ресурсам солнечной и ветровой энергии с последующей ее верификацией по наземным измерениям [36]. Результаты этого этапа работ были отражены в “Атласе ресурсов солнечной энергии на территории России” и “Атласе

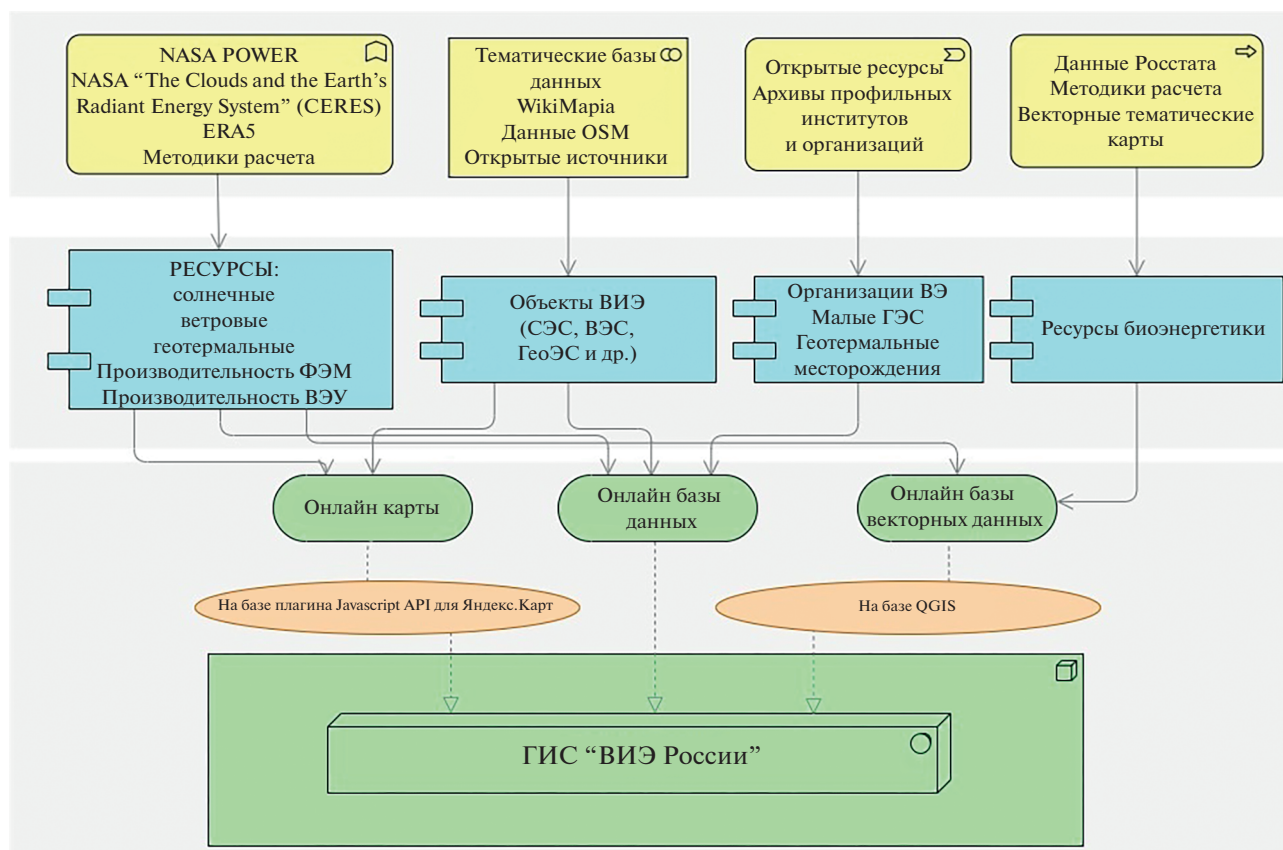


Рис. 1. Структура ГИС "ВИЭ России"

возобновляемой энергии на территории России" [37, 38]. В связи с активным развитием веб-технологий и геоинформационного картографирования естественным стало представление ресурсов, валовых и технических потенциалов солнечной и ветровой энергии в формате геоинформационной системы [39].

Геоинформационная система "ВИЭ России" на сегодняшний день функционирует на базе свободно распространяемой системы управления Word Press, а интерактивные карты созданы с использованием Java Script API на базе системы Яндекс. Карты с помощью авторского плагина. Интерактивные карты включают в себя два крупных тематических блока: карты объектов и карты ресурсов ВИЭ (рис. 1).

Блок объектов ВИЭ на территории России содержит пространственные данные по солнечным электростанциям (СЭС), в том числе солнечно-дизельным (СДЭС), ветровым электростанциям (ВЭС), включая ветродизельные (ВДЭС), солнечным водонагревательным установкам, малым гидроэлектростанциям, геотермальным и приливным электростанциям, электростанциям и котельным на биомассе, а также по организациям

в области возобновляемой энергетики (научным и коммерческим). Источниками информации являются открытые тематические базы данных профильных ассоциаций (Российская ассоциация ветроиндустрии, Российская биотопливная ассоциация, Ассоциация гидроэнергетики России и др.), интерактивные карты с принципом свободного редактирования Wiki Mapia [40], векторные базы данных OSM [6] и другие открытые источники. Карты позволяют получать информацию об объекте (его мощность, статус, год ввода в эксплуатацию, адрес и ссылку на источник информации), осуществлять поиск по названию объекта, фильтровать объекты по типу, а также отображают суммарную мощность представленных на карте объектов.

Блок ресурсов ВИЭ включает в себя интерактивные карты ресурсов солнечной и ветровой энергии, производительности фотоэлектрических модулей (ФЭМ) и ветроустановок (ВЭУ), интерактивную карту разведанных геотермальных месторождений с их характеристиками для территорий Камчатки, Курильских островов и Северного Кавказа. Карты солнечных и ветровых ресурсов отображают информацию в формате полигонов по градусной сетке с возможностью вы-

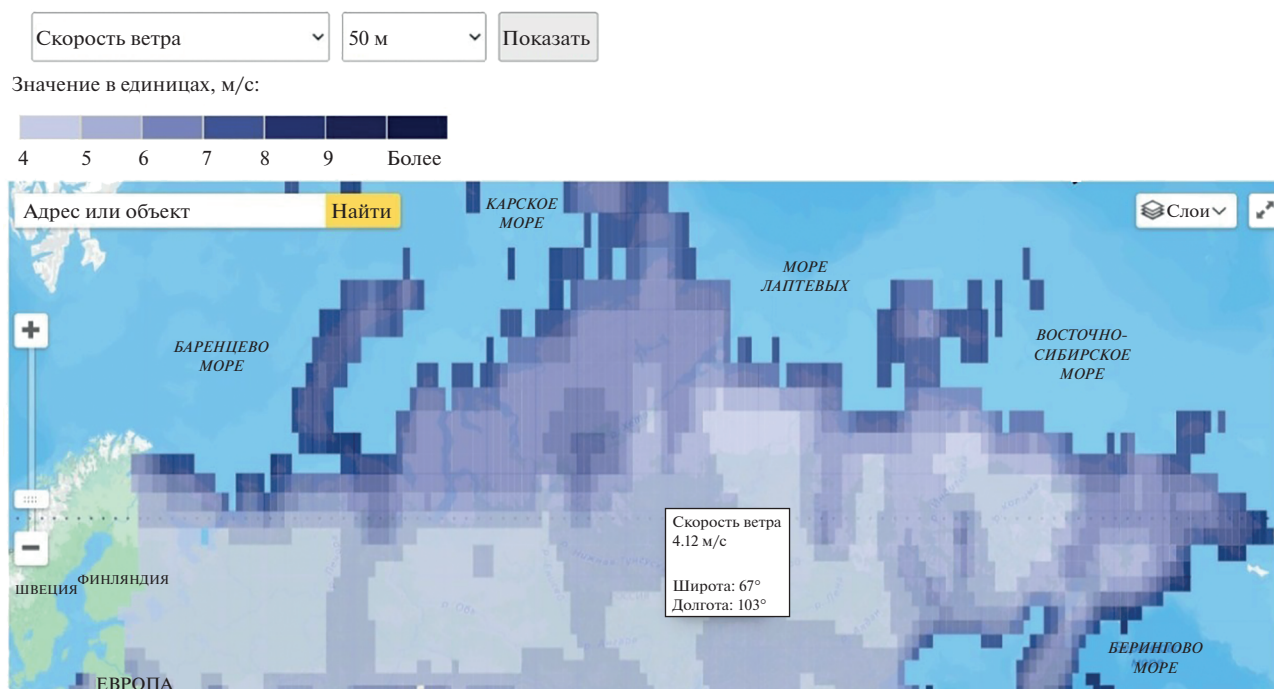
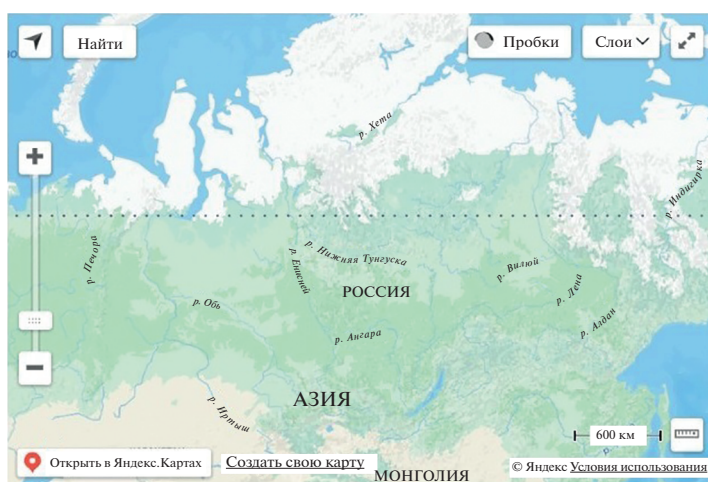


Рис. 2. Фрагмент интерактивной карты ресурсов ветровой энергии: среднегодовая скорость ветра на высоте 50 м

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ (ФЭМ)

ВЫБЕРИТЕ ТОЧКУ НА КАРТЕ



Для отображения данных по производительности ФЭМ выберите координаты на карте или введите в форму ниже

Широта Долгота

Модель ФЭМ

Угол наклона

- Все значения
- 0°
- Широта -15°
- Широта
- Широта +15°
- 90°

Рис. 3. Фрагмент интерактивной базы данных производительности ФЭМ на территории России

бора как типа отображаемого параметра, так и его вторичной характеристики (периода осреднения для солнечной радиации и высоты для характеристик ветровой энергии). Источниками данных служат базы данных NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) [41], проекта NASA “The Clouds and the Earth’s Radiant Energy System”

(CERES) [42], ERA5 Европейского центра среднегопрогноза погоды [5]. На рис. 2–5 приведены примеры компонентов ГИС “ВИЭ России”.

Верификация данных, представленных в указанных выше источниках, является определяющей для обоснования точности оценки ресурсов



Рис. 4. Фрагмент интерактивной карты объектов на ВИЭ

и расчетов производительности солнечных и ветровых станций. В связи с этим детальное сопоставление спутниковых данных, реанализов и наземных наблюдений становится актуальной темой научных изысканий. Так, в работе [43] приведены результаты верификации спутниковых наблюдений (CAMS-RAD, NSRDB, SARAH-2, SARAH-E, CERES-SYN1deg, Solcast) и реанализов (ERA5 и MERRA-2) по суммарной солнечной радиации на горизонтальной поверхности на основе сведений глобальной сети наземных метеостанций (Baseline Solar Radiation Network). По широте охвата источников информации (6 спутниковых программ наблюдения, 2 реанализа, 57 наземных метеостанций), а также длительности сравниваемых рядов (27-летние последовательности часовых данных) это исследование является исключительным. Согласно полученным результатам, минимальное среднеквадратическое отклонение от наземных измерений продемонстрировала коммерческая база спутниковых данных Solcast, реанализы уступают в точности спутниковым наблюдениям.

Поскольку глобальная сеть наземных метеостанций, используемая для верификации в рабо-

тах зарубежных авторов, не включает территорию России (за исключением единичных станций в Арктической зоне), то для отечественных исследований в предметной области задача сопоставления различных источников информации остается актуальной. Ранее авторами [44, 45] как для целей обоснования источников данных для ГИС "ВИЭ России", так и для оценки точности расчета производительности солнечных электростанций была проведена верификация и подтверждена пригодность NASA POWER для оценки производительности фотоэлектрических станций на территории России.

Широкий ряд исследований, посвященных верификации различных источников информации о ветроэнергетических ресурсах проведен специалистами НИУ МЭИ. Так, в [46, 47] были предложены критерии и методика верификации климатических данных, для чего рекомендовано ранжирование разных информационных источников по пяти критериям. Оценка достоверности спутниковых баз данных (NASA POWER) и реанализов (ERA5) была проведена как для перспективных для развития ветроэнергетики регионов России (шельфовые зоны северных морей,

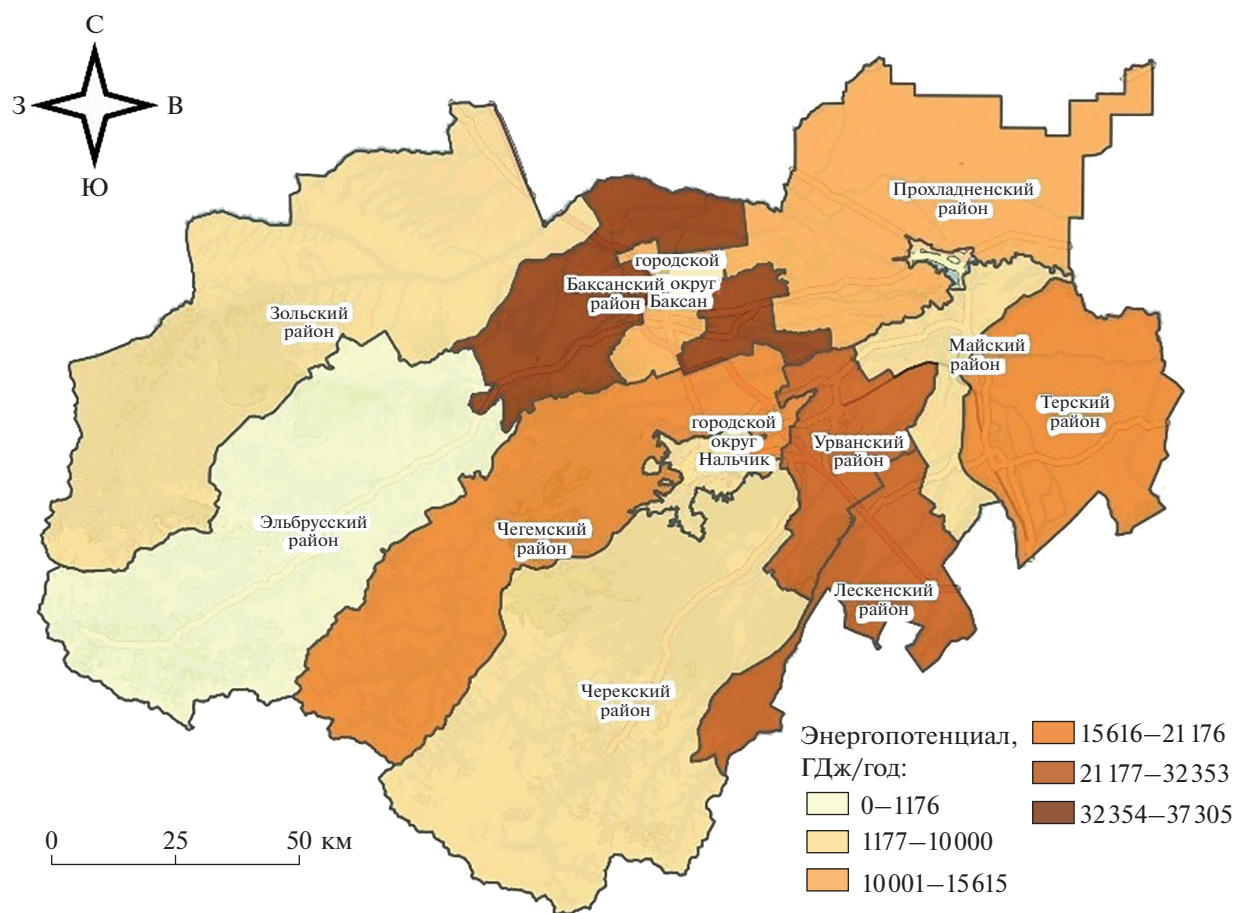


Рис. 5. Пример статичных региональных офф-лайн карт ресурсов биоэнергетики (валовый потенциал производства тепловой энергии при использовании в качестве топлива древесных отходов садоводства, Республика Кабардино-Балкария)

полуостров Камчатка и др.), так и для территорий государств Юго-Восточной Азии [48]. Вопросы повышения достоверности оценки ветроэнергетических ресурсов и выбора адекватной информационной базы рассмотрены также в работе [49] и предложена методика трехуровневой оценки ветроэнергетических ресурсов удаленных малонаселенных территорий с низкой концентрацией источников достоверной природно-климатической информации. Методика была продуктивно использована для регионов России, в частности для территории Арктической зоны, при проектировании ветроэнергетических систем [50].

Базы данных производительности солнечных и ветровых установок в составе ГИС «ВИЭ России» позволяют получить оценки для заданных пользователем на карте или в соответствующем окне географических координат, выбранной модели установки и ее дополнительных характеристик (при необходимости). Детализация по времени – средние, медианные, максимальные и минимальные суточные показатели за каждый

месяц и год в целом. Данные представлены в виде удельных значений производительности в расчете на 1 кВт установленной мощности. Вычисления проведены по часовым последовательностям прихода солнечного излучения и скорости ветра на высоте ВЭУ длительностью 20 лет (2001–2020 гг.).

Выбор фотоэлектрических модулей и ветрогенераторов для расчета производительности определялся текущим состоянием доступных технологий в России и за рубежом. В настоящее время в солнечной энергетике завершён переход на фотоэлектрические модули на основе полужелтоэлементов (half-cell) из монокристаллического кремния, которые благодаря снижению токов через единственный полужелтоэлемент большей площади (вместо кремниевых пластин размером 156×156 мм используются пластины 166×166 , 182×182 , 210×210 мм) и оптимизации контактных структур обеспечивают пониженный уровень омических и оптических потерь. При этом базовой технологией остается PERC (элементы с пассивацией эмиттера и тыльного контакта, – passivated emitter and rear contact)

Характеристики ВЭУ, использованные для расчета их удельной производительности в ГИС “ВИЭ России”

Тип ВЭУ	Производитель	Мощность, кВт	Средняя высота мачты, м
SG 3.4-132 Siemens-Gamesa	ООО “Сименс Технологии Газовых Турбин” (СТГТ)	3400	154
V126 Vestas	Роснано-Фортум	3400	100
L100 Lagerwey	НоваВинд	2500	100
KWT300 KOMAI HALTEC	KomaiHaltec	300	42

в силу относительной простоты и малой чувствительности к качеству исходных пластин [51]. Такие модули, в основном китайского производства, доступны в России у целого ряда дистрибьюторов. В то же время в самой России локализовано производство более высокотехнологичных модулей по гетероструктурной кремниевой технологии (Heterojunction technology – HJT), выпускаемых компанией “Хевел” [51]. Они массово используются при реализации проектов крупных сетевых фотоэлектрических станций и также доступны у дистрибьюторов. Наконец, технология тыльных переплетенных контактов (Interdigitated back contacts – IBC) остается одним из лидеров по достижению высокого КПД. В последние годы удалось добиться прогресса в повышении технологичности и снижении стоимости таких элементов и модулей [52]. В России высокоэффективные модули собираются из произведенных за рубежом элементов компанией ЗАО “Телеком-СТВ”, однако в их паспортах отсутствует весь спектр необходимых для моделирования работы модуля параметров, поэтому в ГИС интегрирован зарубежный аналог (Futura Sun).

При выборе ветрогенераторов предпочтение отдавалось системам, производство которых локализовано на территории России [53], однако они могут быть использованы только при строительстве крупных ВЭС. Для систем меньшей мощности, работающих преимущественно в составе ветродизельных станций, рассматривались установки Komai Haltec 300 (Япония), которые применялись при реализации некоторых подобных проектов на Дальнем Востоке. Для мощностей менее 100 кВт наиболее перспективными выглядят китайские ветрогенераторы серии Ghrepower FD16, разработанные с участием российских специалистов и адаптированные к условиям российской Арктики [54]. Таким образом, выбранные системы уже применяются на территории страны и перекрывают широкий диапазон мощностей [55].

При расчетах производительности фотоэлектрических модулей учитывались их КПД, зависящие от условий окружающей среды и транслиру-

емой мощности. На основе метеорологических и актинометрических данных, а также паспортных показателей проводилась оценка температуры фотоэлектрического модуля для каждого часа. Расчеты выполнены для трех типов ФЭМ: Хевел HVL-395/HJT (пиковая мощность 395 Вт), Ja Solar Half Cell PERC 72 cells JAM72S30 (540), Futura Sun Zebra 345 W (345).

В основу расчетов удельной производительности ВЭУ положены часовые данные по скоростям ветра, а также паспортные кривые выдачи мощности ветрогенераторов. В случае, когда высота мачты ветроустановки не совпадала с высотами реанализа (10 и 100 м), проводился перерасчет скоростей ветра на заданную высоту в предположении степенной зависимости. Вычисления были проведены для четырех типов ВЭУ (см. таблицу).

Помимо карт в ГИС “ВИЭ России” содержатся следующие интерактивные базы данных:

“Малые ГЭС России” с детальным описанием объектов в формате pdf (по данным профильных организаций);

“Проектные, научно-исследовательские, коммерческие организации в области возобновляемой энергетики” с возможностью осуществления выборки по субъектам РФ и по типу организаций (по данным открытых источников).

В ГИС присутствует также блок “Биоэнергетика”, включающий в себя статические карты валового и технического потенциалов отходов биомассы на территории России (осадков сточных вод, твердых коммунальных отходов, отходов растениеводства различных видов). Методически этот раздел ГИС опирается на “Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива” [56], который является одним из самых востребованных изданий по возобновляемой энергетике в России. В настоящее время раздел биоэнергетики в ГИС обновляется путем внедрения в него интерактивных карт, обеспечивающих возможность перехода от уровня национальных обзорных карт к картам субъектов России с распределением по-

тенциалов по муниципальным образованиям. В офф-лайн формате с использованием открытого программного обеспечения QGIS [57] подготовлены базы векторных данных и тематические карты валового и технического потенциалов отходов растениеводства, животноводства, садоводства и виноградарства для регионов Юга России (по муниципальным образованиям).

ВЫВОДЫ

1. Изучение геоинформационных систем в области возобновляемой энергетики, разрабатываемых в научных центрах различных стран мира начиная с 80-х годов прошлого века, свидетельствует о значительном прогрессе в развитии этого инструмента и его большом значении для оценки и пространственного анализа ресурсов ВИЭ. Геоинформационные системы все чаще используются не только как способ представления информации, но и как инструмент принятия решений по оптимизации мощности и состава энергогенерирующих станций с учетом физико-географических условий местности, дорожной и сетевой инфраструктуры, типа и мощности потребителей, экологических ограничений.

2. В России разработки в области создания веб-атласов возобновляемых источников энергии и геоинформационной системы были начаты в начале 2010 г. В настоящее время в ГИС “ВИЭ России” в формате интерактивных карт представлены оценки ресурсной базы возобновляемой энергетики страны. Система позволяет по заданным координатам оценивать ресурсы, валовый и технический потенциалы солнечной и ветровой энергии, предоставляет данные по геотермальным ресурсам полуострова Камчатка, Курильских островов и Северного Кавказа, содержит базы данные об объектах и проектах ВИЭ всех типов на территории России, а также о научных, образовательных и коммерческих организациях, работающих в сфере ВЭ.

3. Прогресс технологий, расширение объемов установленных мощностей возобновляемой энергетики в РФ, внедрение мер поддержки, в том числе в области микрогенерации, определяют необходимость и целесообразность глубокой модернизации ГИС “ВИЭ России” в целях повышения ее практической значимости. В связи с этим в рамках системы созданы базы данных многолетней средней удельной производительности современных солнечных и ветровых установок с пространственной детализацией $1^\circ \times 1^\circ$ для всей территории страны. Проводится актуализация данных по оценке ресурсов и потенциалов биоэнергетики для территории России с учетом динамики сельскохозяйственного производства — крупнейшего источника органических отходов. Ведутся разработки, направленные на представление данных в интерактивном формате с воз-

можностью перехода от уровня национальных обзорных карт к региональным картам субъектов России с детализацией до муниципальных образований. Наиболее сложной задачей является создание системы поддержки принятия решений в области возобновляемой энергетики, для чего необходимо развивать региональные модули с подробными данными об инфраструктуре (сети, подстанции, генерирующие объекты, потребление энергии) и калькуляторами баланса производства и потребления энергии от ВИЭ.

4. Развитие ГИС “ВИЭ России” представляет важным компонентом успешной реализации Стратегии научно-технологического развития, Энергетической стратегии России и требует привлечения к реализации проекта широкого круга заинтересованных специалистов, организаций и государственных ведомств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГИС “Возобновляемые источники энергии России”. <http://gisre.ru/>
2. **ReEExplorer** mapping our energy future. <https://www.re-explorer.org/lcoe-tool.html>
3. **Global** atlas for renewable energy. <http://globalatlas.irena.org>
4. **Solargis**. <https://solargis.com>
5. **ERA5**: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 2022, post-processed by Solargis. <https://cds.climate.copernicus.eu/>
6. **Open Street Map**. <https://www.openstreetmap.org/>
7. **Java** wrapper for Leaflet, a JavaScript library for mobile-friendly interactive maps. https://github.com/makbn/java_leaflet
8. **Sustainable** bioenergy for heat of Ireland. <https://www.seai.ie/technologies/seai-maps/bioenergy-map/>
9. **Bioenergy** simulator. IRENA. <https://biosimulator.irena.org/>
10. **Geographic** information systems (GIS) approach for assessing the biomass energy potential and identification of appropriate biomass conversion technologies in Nigeria / M.O. Ukoba, E.O. Diemuodeke, T.A. Briggs, M. Imran, K. Owebor, C.O. Nwachukwu // Biomass Bioenergy. 2023. V. 170. P. 106726. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106726>
11. **Bravo J.D., Casals X.G., Pascua I.P.** GIS approach to the definition of capacity and generation ceilings of renewable energy technologies // Energy Policy. 2007. V. 35. P. 4879–4892. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.04.025>
12. **A GIS** decision support system for regional forest management to assess biomass availability for renewable energy production / P. Zambelli, C. Lora, R. Spinelli, C. Tattoni, A. Vitti, P. Zattel, M. Ciolli // Environ. Modell. Software. 2012. V. 38. P. 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.05.016>

13. **Energy**, economic and environmental GIS-based analysis of shallow geothermal potential in urban areas – A Spanish case example / A. Ramos-Escudero, I.C. Gil-García, M.S. García-Cascales, A. Molina-García // *Sustainable Cities and Soc.* 2021. V. 75. P. 103267. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103267>
14. **Geothermal** resource exploration in South America using an innovative GIS-based approach: A case study in Ecuador / J. Jara-Alvear, T. de Wilde, D. Asimbaya, M. Urquiza, D. Ibarra, V. Graw, P. Guzman // *J. South Am. Earth Sci.* 2023. V. 122. P. 104156. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104156>
15. **Martínez-Martínez Y., Dewulf J., Casas-Ledón Y.** GIS-based site suitability analysis and ecosystem services approach for supporting renewable energy development in south-central Chile // *Renewable Energy.* 2022. V. 182. P. 363–376. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.008>
16. **Enhancement** of sustainable bioenergy production by valorizing tomato residues: AGIS-based model / F. Valenti, M.C.M. Parlato, B. Pecorino, R. Selvaggi // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 869. P. 161766. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161766>
17. **Sliz-Szkliniarz B., Vogt J.** GIS-based approach for the evaluation of wind energy potential: A case study for the Kujawsko–Pomorskie Voivodeship // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2011. V. 15. No. 3. P. 1696–1707. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.045>
18. **Тулегенова А.А., Киселева С.В.** Использование методов пространственного анализа для оценки потенциала производства энергии при помощи биогазовых станций // *Проблемы региональной экологии.* 2018. № 6. С. 73–77. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-16073>
19. **Evaluating** the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: A GIS and lifecycle cost-based assessment of Western China's options / J. Byrne, A. Zhou, B. Shen, K. Hughes // *Energy Policy.* 2007. V. 35. No. 8. P. 4391–4401. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.02.022>
20. **Aydin N.Y., Kentel E., Duzgun H.S.** GIS-based sites election methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from Western Turkey // *Energy Convers. Manage.* 2013. V. 70. P. 90–106. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.004>
21. **A technical** and economic analysis of three large scale biomass combustion plants in the UK / D.R. McIlveen-Wright, Y. Huang, S. Rezvani, D. Redpath, M. Anderson, A. Dave, N.J. Hewitt // *Appl. Energy.* 2013. V. 112. P. 396–404. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.051>
22. **Sorensen B., Meibom P.** GIS tools for renewable energy modelling // *Renewable Energy.* 1999. V. 16. No. 1–4. P. 1262–1267. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00514-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00514-X)
23. **Santoli L., Mancini F., Garcia D.A.** A GIS-based model to assess electric energy consumptions and usable renewable energy potential in Lazio region at municipality scale // *Sustainable Cities Soc.* 2019. V. 46. P. 101413. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.041>
24. **A GIS-based** decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil / C. Tiba, A.L.B. Candeias, N. Fraidenraich, E.M. de S. Barbosa, P.B. de Carvalho Neto, J.B. de Melo Filho // *Renewable Energy.* 2010. V. 35. P. 2921–2932. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.05.009>
25. **A GIS-based** offshore wind site selection model using fuzzy multi-criteria decision-making with application to the case of the Gulf of Maine / J.M. Sánchez-Lozano, A. Ramos-Escudero, I.C. Gil-García, M.S. García-Cascales, A. Molina-García // *Expert Syst. Appl.* 2022. V. 210. P. 118371. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118371>
26. **Multi-criteria** spatial decision-making support system for renewable energy development in Kazakhstan / R.I. Mukhamediev, R. Mustakayev, K. Yakunin, S. Kiseleva, V. Gopejenko // *IEEE Access.* 2019. V. 7. P. 122275–122288. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937627>
27. **A suitability** mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility / B. Elboshy, M. Alwetaishi, R.M.H. Aly, A.S. Zalhaf // *Ain Shams Eng. J.* 2022. V. 13. № 3. P. 101618. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.013>
28. **Geolocation** of photovoltaic farms using Geographic Information Systems (GIS) with Multiple-criteria decision-making (MCDM) methods: Case of the Ecuadorian energy regulation / G. Villacreses, J. Martínez-Gómez, D. Jijón, M. Cordovez // *Energy Rep.* 2022. V. 8. P. 3526–3548. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.152>
29. **AGIS-AHP** approach for determining the potential of solar energy to meet the thermal demand in south eastern Spain productive enclaves / J.A. Romero-Ramos, J.D. Gil, J.M. Cardemil, R.A. Escobar, I. Arias, M. Pérez-García // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2023. V. 176. P. 113205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113205>
30. **An AHP-GIS** based site suitability analysis for integrating large-scale hybrid CSP+PV plants in Morocco: An approach to address the intermittency of solar energy / O. Jbahi, F.Z. Ouchani, A.A. Merrouni, M. Cherkaoui, A. Ghennioui, M. Maarouf // *J. Cleaner Prod.* 2022. V. 369. P. 133250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133250>
31. **GIS-based** modeling of electric-vehicle-grid integration in a 100% renewable electricity grid / M. Lia, M. Lenzena, D. Wang, K. Nansai // *Appl. Energy.* 2020. V. 262. P. 114577. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114577>
32. **Karipoglu F., Genç M.S., Akarsu B.** GIS-based optimal site selection for the solar-powered hydrogen fuel charge stations // *Fuel.* 2022. V. 324. Part B. P. 124626. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124626>
33. **La Guardia M., D'Ippolito F., Cellura M.** A GIS-based optimization model finalized to the localization of new

- power-to-gas plants: The case study of Sicily (Italy) // *Renewable Energy*. 2022. V. 197. P. 828–838. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.120>
34. **Указ** Президента РФ № 143 от 15.03.2021 “О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации”.
 35. **Распоряжение** Правительства РФ № 1523-р от 09.06.2020 “Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года”.
 36. **Климатические** данные для возобновляемой энергетики России (база климатических данных): учеб. пособие / О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.В. Киселева, Ю.Г. Коломиец, Н.В. Лисицкая. М.: Изд-во МФТИ, 2010.
 37. **Атлас** ресурсов солнечной энергии на территории России / О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиец, С.В. Киселева, Е.Н. Терехова. М.: ОИВТ РАН, 2010.
 38. **Атлас** ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. изд. / Т.И. Андреевко, Т.С. Габдрахманова, О.В. Данилова, Г.В. Ермоленко, С.В. Киселева, М.А. Колобаев, Ю.Г. Коломиец, Е.А. Медведева, Л.В. Нефедова, О.С. Попель, Ю.Ю. Рафикова, С.Е. Фрид, В.П. Шакун М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015.
 39. **Разработка** геоинформационной системы “Возобновляемые источники энергии России: постановка задачи и выбор методов” / М.В. Гридасов, С.В. Киселева, Л.В. Нефедова, О.С. Попель, С.Е. Фрид // *Теплоэнергетика*. 2011. № 11. С. 38–46.
 40. **Wikimapia**. <https://wikimapia.org>
 41. **The NASA POWER project**. Solar and meteorological data sets. <https://power.larc.nasa.gov/>
 42. **The Clouds and the Earth’s Radiant Energy System (CERES) SYN1deg**. <https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/SYN1degEd41Selection.jsp>
 43. **Yang D., Bright J.M.** Worldwide validation of 8 satellite-derived and reanalysis solar radiation products: A preliminary evaluation and overall metrics for hourly data over 27 years // *Sol. Energy*. 2020. V. 210. P. 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.016>
 44. **Comparative** analysis of simulation models for network photovoltaic power plants / A.V. Tarasenko, S.V. Kiseleva, O.S. Popel, S.E. Frid, T.S. Gabderakhmanova, N.R. Avezova, V.M. Simonov, M.Zh. Suleimanov // *Appl. Sol. Energy*. 2020. V. 56. P. 212–218. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20030111>
 45. **Актинометрические** данные для проектирования солнечных энергоустановок в Московском регионе / Ю.Г. Коломиец, Е.В. Горбаренко, С.В. Киселева, А.В. Мордынский, С.Е. Фрид, О.А. Шиловцева // *Альтернативная энергетика и экология*. 2016. № 21–22. С. 12–24.
 46. **Дерюгина Г.В., Игнатъев Е.В., Кудрявцев А.Р.** Анализ влияния различных информационных источников на технико-экономические показатели ветроэлектрической установки // *Вестник МЭИ*. 2022. № 3. С. 53–62. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-3-53-62>
 47. **Дерюгина Г.В., Зай Яр Лин, Тягунов М.Г.** Верификация данных для использования в региональной геоинформационной системе “Возобновляемые источники энергии” // *Энергетик*. 2017. № 5. С. 36–40.
 48. **Игнатъев Е.В., Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г.** Выбор информационных источников для проведения ветроэнергетических расчетов в прибрежной акватории Мурманской области // *Новое в российской электроэнергетике*. 2019. № 3. С. 42–53.
 49. **Дюльдин М.В., Елистратов В.В.** Оценка ветроэнергетических ресурсов в условиях ограниченной природно-климатической информации // *Тр. Кубанского гос. аграр. ун-та*. 2017. № 64. С. 227–233.
 50. **Елистратов В.В., Дюльдин М.В., Сливканич М.А.** Особенности оценки ветроэнергетических ресурсов в полярных регионах России // *Мат. третьей междунар. конф. “Полярная механика”*. Владивосток: ДВФУ, 27–30 сент. 2016 г. С. 807–814.
 51. **Out-door** reliability and degradation of HIT, CIGS, n-type multi-busbar, PERC, and CdTe modules in Shanghai, China / B. Gao, Y. Shao, W. Liu, H. Xiang, Y. Yu, Z. Liu // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2022. V. 236. P. 111490. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111490>
 52. **Enablers** for IBC: integral cell and module development and implementation in PV industry / I. Cesar, N. Guillemin, A.A. Mewe, P. Spinelli, A.R. Burgers, V. Rosca, L.A.G. Okel, B.J. Geerligs, A.W. Weeber, S. Sawallich, M. Nagel // *Energy Procedia*. 2017. V. 124. P. 834–841. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.355>
 53. **Гильманов Р.А., Куделин А.Г.** Автоматизированная система оценки эффективности ветрогенерации электроэнергии на территории Российской Федерации. Подсистема “Погода” // *Информационные технологии в управлении и экономике*. 2020. № 4 (21). С. 52–64.
 54. **Автономное** энергоснабжение с использованием ветроэнергетического комплекса и водородного аккумулирования энергии / С.И. Нефедкин, А.О. Барсуков, М.И. Мозгова, М.С. Шичков, М.А. Климова // *Альтернативная энергетика и экология*. 2019. № 16–18 (300–302). С. 12–26. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2019.16-18.012-026>
 55. **Елистратов В.В., Конищев М.А.** Ветро дизельные электростанции для автономного энергоснабжения северных территорий России // *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 11 (151). С. 62–71.
 56. **Безруких П.П.** Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям). М.: ИАЦ “Энергия”, 2007.
 57. **Свободная** географическая информационная система с открытым кодом. QGIS. <https://qgis.org/ru/site/>

Geoinformation Systems for Renewable Energy (Review)

S. V. Kiseleva^{a, b, *}, N. V. Lisitskaya^b, O. S. Popel^b, Yu. Yu. Rafikova^a,
A. B. Tarasenko^b, S. E. Frid^b, and V. P. Shakun^a

^a *Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^b *Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Moscow, 125412 Russia*

**e-mail: k_sophia_v@mail.ru*

Abstract—A brief review is presented of geoinformation systems (GIS) intended for collection, storage, integration, analysis, and graphical interpretation of spatial and temporal data on various technologies for the application of renewable energy sources (RESs) to make substantiated decisions on the development of RES-based energy (hereinafter referred to as renewable energy). The development of the geoinformation system “Renewable Energy Sources of Russia” (GIS “RES of Russia”) commenced in 2010 and was performed by specialists from the Faculty of Geography of Moscow State University and JIHT RAS. It is focused on the spatial mapping of solar and wind energy resources in the territory of Russia. The initial data for the assessment of these resources are formed mainly on the basis of satellite measurements, mathematical modeling, and verification of the results against ground-based meteorological observations. The geographic information system also contains data on existing and designed renewable energy facilities and scientific, educational, and commercial organizations engaged in this area. As the geoinformation system has been developing, it has been supplemented with information on the distribution of geothermal energy resources and the energy of small rivers over the territory of Russia as well as with estimates of the specific capacity of solar and wind energy installations, the gross and technical potential of crop, livestock, horticulture, and viticulture waste. The paper briefly describes the methods and approaches employed for the development of GIS, including those for improvement of the spatial resolution of resource data and calculation of the technical potential of renewable energy sources considering hi-tech advancements; lines for further development and improvement of the domestic geoinformation system are formulated.

Keywords: geoinformation system, renewable energy, resources, gross and technical potential, capacity of installation, energy-generating facilities