

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ АГРОБИОМАССЫ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ, КРАСНОДАРСКОМ И СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЯХ

Т.И. Андреев¹, С.В. Киселева², Ю.Ю. Рафикова³

¹⁻³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ возобновляемых источников энергии

¹ Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: tanyandr00@mail.ru

² Вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: k_sophia_v@mail.ru

³ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ju.rafikova@mail.ru

В настоящее время использование органических отходов для получения энергии стало значимым направлением мировой энергетики. При этом решается не только задача энергообеспечения, но и утилизации отходов. Особый интерес в связи с большими объемами ежегодно формируемого ресурса, возможностью обеспечить недорогую логистику и востребованностью получаемой энергии на уровне местного потребления привлекает задача утилизации отходов сельского хозяйства. В работе представлена методика оценки энергетического потенциала отходов растениеводства с учетом вида сельскохозяйственных культур, энергосодержания и особенностей технологии их переработки с получением тепловой энергии. В качестве территорий исследования выбраны регионы России – лидеры по производству зерновых, подсолнечника и кукурузы (Ставропольский и Краснодарский края, Ростовская область) – как в силу значительности энергопотенциала, так и в связи с наличием опыта получения энергии из отходов на Юге России. Определены количественные показатели тепловой энергии из отходов этих культур (по регионам суммарно по всем культурам 61,32, 128,1 и 122,22 млн ГДж/год), а также доля покрытия нагрузки теплоснабжения в жилом секторе регионов (124, 120 и 160%). Методами кластерного анализа определены группы муниципальных районов, самодостаточных по этому местному энергоресурсу, а также потенциальных «доноров» топлива из отходов. Результаты отображены на диаграммах и серии карт.

Ключевые слова: биоэнергетика, сельскохозяйственные отходы, ресурсы, потенциал энергообеспечения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.5

ВВЕДЕНИЕ

Стремление к диверсификации энергетических ресурсов и сокращению воздействия на окружающую среду объектов традиционной энергетики и полигонов органических отходов стимулирует развитие современной биоэнергетики, которая достигла к настоящему времени значительных масштабов. В 2020 г. мировая биоэнергетика обеспечила производство около 44 ЭДж энергии в целом, из которых 14,7 ЭДж тепловой энергии (7,6% глобального потребления тепла), 3,7 ЭДж – на транспортные нужды (3,5%) и 1,8 ЭДж – на электроснабжение (2,4%). Максимальные темпы роста биоэнергетических мощностей наблюдаются в электроэнергетике: в 2021 г. установленная мощность электростанций на биомассе в мире достигла 158 ГВт [REN21..., 2022].

Развитие биоэнергетики идет интенсивно в разных регионах мира, особенно активно в Европейском Союзе (ЕС) в связи с целым комплексом факторов, в том числе климатическими обязательствами, задачами повышения энергонезависимости и экологическими проблемами обращения с отхо-

дами производства и потребления. В странах ЕС в силу больших объемов сельскохозяйственного производства технический энергетический потенциал отходов варьирует от 0,8 до 3,9 ЭДж/год. Лидером по энергетическому использованию отходов растениеводства, в первую очередь соломы, является Дания, где из ежегодно образуемых 6 млн т соломы более 1,5 млн т сжигается для производства энергии [Danish energy sector..., 2022]. В Великобритании эксплуатируется свыше 80 электростанций на биомассе (древесина, подстилочный материал птицефабрик, смесевое топливо (биомасса и уголь)) общей мощностью более 4000 МВт, в том числе самые крупные в мире ТЭЦ на соломе. Технологии производства энергии из растительных остатков активно развиваются и в других странах ЕС: Польше, Испании, Италии и Швеции. В лидеры биоэнергетики вышел Китай, где оценки потенциала только растительных остатков сельскохозяйственного производства дают около 536 ЭДж/год; при этом в стране развивается использование для электро- и теплоснабжения остатков заготовки леса и твердых

бытовых отходов. К 2020 г. введено в эксплуатацию более 1300 электростанций на биомассе с установленной мощностью 29 520 МВт и производством электроэнергии 13 260 ГВтч/год [Guo et al., 2022].

Исследования различных аспектов развития биоэнергетики на сельскохозяйственных отходах широко представлены в научной литературе. Анализ зарубежных работ позволяет выделить следующие основные актуальные направления в тематической области:

1. Определение энергетического потенциала биомассы отходов от основных источников (лесного и сельского хозяйства, а также энергетических плантаций) с учетом технических характеристик технологий биоэнергетики в региональном [Bentsen, Felby, 2012; Fraia et al., 2020] и глобальном масштабах [Berndes et al., 2003; Offermann et al., 2003].

2. Совершенствование алгоритма оценки энергетического потенциала растительных остатков сельскохозяйственных культур путем уточнения удельного образования отходов, их энергосодержания, доступных объемов отходов для выноса с пашни в зависимости от региональных условий. Определение оптимального местоположения объектов переработки отходов на основании пространственного распределения потенциала энергетических ресурсов с помощью геоинформационных методов анализа [Sliz-Szkliniarz, Vogt, 2012; Karan, Hamelin, 2021; Guler et al., 2022].

3. Оценка на региональном или локальном уровне экономической эффективности производства и использования различных видов топлива из сельскохозяйственных отходов [Somerville, 2006; Kralo et al., 2022; Bilandzija et al., 2018, Ruiz et al., 2019].

Несмотря на значительную ресурсную базу, доля биоэнергетики в энергетическом балансе России оценивается в настоящее время в 1–1,6%. В некоторых субъектах РФ работают электростанции и котельные на биотопливе из отходов лесного комплекса и древесной щепы [Ракитова, 2021]. Производство древесных пеллет в 2020 г. достигло 2,2 млн т/год и до недавнего времени было ориентировано, в основном, на экспорт. В связи с потерей зарубежного рынка биотоплива Правительством РФ предусмотрено стимулирование перевода мазутных котельных на древесные пеллеты. Сельскохозяйственные отходы – более сложное сырье, требующее зачастую иных, по сравнению с древесными отходами, технологических решений (например, в связи с большим содержанием хлора, натрия и калия в соломе зерновых, а также низкой температурой плавления золы этих культур). Однако огромные объемы ежегодного образования этих отходов, значительная часть которых сжигается на полях и плантациях, накопленный опыт их утилизации за рубежом, раз-

вивающийся отечественный рынок оборудования позволяют считать энергетический потенциал этих ресурсов в наиболее развитых сельскохозяйственных регионах страны перспективным. Зерновые, масличные и технические культуры занимают более $\frac{2}{3}$ всех посевных площадей России. Утилизация послеуборочных остатков на полях представляет для российских сельхозпроизводителей давнюю проблему, требующую дополнительных материальных и трудовых затрат. Традиционное ежегодное сжигание стерни и пожнивных растительных остатков на полях, особенно в Центральном и Южном ФО, является причиной порядка 30% лесных пожаров. Однако масштабного развития биоэнергетики на сельскохозяйственных отходах до недавнего времени не происходило, в основном (по данным опросов) вследствие дефицита информации и технических средств для реализации проектов. С 2010-х гг. эту нишу постепенно начали заполнять иностранные и отечественные производители оборудования для изготовления пеллет из агросырья и отопительных систем различной мощности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основы методики оценки объемов отходов сельскохозяйственной продукции и их энергосодержания были разработаны еще в 1990-х гг. и вошли в документы различных международных организаций [Ryan, Openshaw, 1991]. Алгоритм расчетов верифицирован и применяется в большинстве исследований в предметной области. Он включает последовательное определение следующих величин:

- основные сельскохозяйственные культуры региона и площади под ними;
- урожайность сельскохозяйственных культур (пшеница, рожь, ячмень, овес, кукуруза, рис, рапс, подсолнечник и др.);
- отношение пожнивных остатков к урожайности;
- энергосодержание отходов в зависимости от вида культуры;
- скорость и степень удаления пожнивных остатков в соответствии с экологическими ограничениями и требованиями сохранения плодородия почвы;
- доля растительных остатков, используемых для подстилки животным (крупный рогатый скот, лошади и овцы), производства грибов и в отраслях промышленности.

Существуют различия в подходах к оценкам ресурсов биомассы (фактического объема образующихся отходов). В одном случае биомасса отходов оценивается как произведение валового сбора урожая культуры и индекса урожая (отношения массы всей надземной части растения к массе полезной

части). При втором подходе посевная площадь, с которой убран урожай, умножается на коэффициент массы отходов, приходящейся на единицу площади поля. Соотношение полезной части растения к остатку для большинства сельскохозяйственных растений определялось в многочисленных исследованиях [Ryan, Openshaw, 1991; Коррежан, 1997; Jolli, Giljum, 2005]. Эти работы показали, что выбор средних значений приводит к значительным погрешностям, поскольку соотношения различаются как между основными сортами культур, так и для одного и того же сорта, выращиваемого в разных условиях. Именно изменчивость экологических и агрономических факторов служит одной из причин разброса оценок объемов отходов растениеводства и, следовательно, общего объема ресурсов биомассы для биоэнергетики как в общенациональном, так и в глобальном масштабе. Все энергетические ресурсные потенциалы выражаются через низшую теплотворную способность первичной биомассы, которая также определяется экспериментально для каждой культуры [Клюс, Забарный, 2011].

В России методика оценки биоэнергетических ресурсов была развита в связи с исследованиями ресурсов и потенциалов возобновляемых источников энергии, инициированными Министерством

энергетики РФ в начале 2000 г. [Справочник по ресурсам..., 2007]. В Атласе [Атлас ресурсов..., 2015] был расширен спектр источников органических отходов, однако оценки были проведены с детализацией до субъектов РФ, что не обеспечивает достаточную точность, особенно для крупных по площади субъектов РФ.

В представленной работе при оценке потенциала биоэнергетики в качестве ресурсов рассматривались органические отходы однолетних пропашных культур (зерновых, кукурузы, подсолнечника), образующиеся на территории Краснодарского, Ставропольского краев и Ростовской области с детализацией до муниципальных образований. Для определения энергии, заключенной в биомассе отходов (валовый энергетический потенциал), использовались значения массы отходов и их удельное энергосодержание (низшая теплота сгорания). Масса ежегодно образующихся органических отходов пропашной культуры вида i (M_i) рассчитывалась с использованием статистических данных о годовом валовом сборе культуры (N) и коэффициентов соотношения отходов и полезной части растения (L_i) (табл. 1):

$$M_i = N_i \cdot L_i, \quad (1)$$

Таблица 1

Доля отходов в общей массе продукции растениеводства и их энергосодержание [Клюс, Забарный, 2011]

Вид исходной биомассы	Коэффициент соотношения отходов и полезной части растения, кг/кг	Удельное энергосодержание отходов, МДж/кг
Зерновые культуры	1,0	14,70 (для воздушно-сухой соломы)
Кукуруза на зерно (стебли)	1,2	13,73 (для воздушно-сухих отходов)
Подсолнечник на зерно:		
– стебли	3,5	13,44
– лузга	0,18	15,75

Тогда валовый энергетический потенциал (энергия образующихся за год органических отходов) рассчитывался как произведение массы отходов на их удельное энергосодержание (K_i):

$$Q_i = M_i \cdot K_i. \quad (2)$$

Валовый сбор урожая сельскохозяйственных культур определялся на основе данных Росстата 2019 г. различного уровня генерализации (субъекты РФ / муниципальные образования) [Валовый..., 2023; Площади..., 2023]. Технический энергетический потенциал биомассы отходов (количество энергии, которое возможно произвести из доступной биомассы современными технологиями с

учетом экологических и иных ограничений) рассчитывался на основе валового потенциала в предположении, что электроэнергию и тепло получают на мини-ТЭС с прямым сжиганием биомассы. При этом учитывались коэффициенты преобразования энергии биомассы в тепло и электроэнергию (соответственно 0,80 и 0,35), а также доля тепла и электроэнергии на собственные нужды установок (0,14 и 0,03).

В ряде региональных исследований был проведен анализ и обоснована экономическая эффективность использования в энергетических целях отходов сельскохозяйственного производства, в первую очередь соломенных пеллет (в том числе, торрефицированных), в регионах РФ с наиболее развитым растениеводством – Краснодарский, Ставрополь-

ский края, центральный и южные районы Ростовской области, Воронежская область и др. [Передерий, 2010]. Рентабельность использования отходов масличных культур (лузга подсолнечника) в котельных и мини-ТЭЦ была достигнута на многих комбинатах растительных масел (например, на Миллеровском и Морозовском маслоэкстракционных заводах Ростовской области [Володарец, 2021]).

Общие экономические оценки даже на уровне субъектов РФ в данной области делать достаточно сложно в связи с зависимостью результатов от местных условий, а именно территориального распределения источников отходов (сельскохозяйственных предприятий), потенциальных местных потребителей, действующих объектов энергогенерации, видов используемого сырья, цен на отпускаемую тепловую и электрическую энергию. Поэтому первым этапом таких оценок является анализ ресурсов и энергетического потенциала отходов, формирующихся в субъектах и муниципальных образованиях.

Краснодарский и Ставропольский края, а также Ростовская область являются лидерами среди регионов России по производству зерна. Соответственно по регионам валовый сбор зерна в хозяйствах всех категорий составил (в 2022 г.) – 14 794 100, 9 101 500 и 13 542 500 т, кукурузы (в 2019 г.) – 2 517 000, 729 000, 789 000 т [Валовой... по категориям хозяйств..., 2023], подсолнечника (в 2021 г.) – 1 070 000 т в Краснодарском крае, 1 900 000 т в Ростовской области. Эти регионы очень неоднородны по уровню самообеспеченности энергоресурсами. Если Краснодарский край по электроэнергетическому балансу является хронически дефицитным (отношение производства к потреблению в 2021 г. составило 37,4%), то Ставропольский край (164,7%) и Ростовская область (223,0%) находятся по этому показателю в лидерах России. Поскольку в основном производство электроэнергии осуществляется на ТЭЦ (или АЭС – в Ростовской области), то косвенно данный показатель отражает не только баланс электроэнергии, но и тепловой энергии в централизованном энергоснабжении. Однако, практически во всех сельскохозяйственных регионах России в большей или меньшей степени стоит проблема низкой доступности к объектам энергетической инфраструктуры. В частности, менее 40% крупных и средних сельскохозяйственных производителей имеют доступ к сетевому газу.

Использование агробиомассы наиболее оптимально для энергообеспечения собственных нужд предприятий или локальных потребителей в непосредственной близости к источникам ресурсов, поэтому оценки были проведены с детализацией до уровня муниципалитетов. Низкий КПД преобразования энергии отходов в электроэнергию за-

ставляет рассматривать только потенциал замещения энергией отходов теплотребления и горячего водоснабжения в жилом секторе. Промышленные предприятия в связи с нерентабельностью транспортировки отходов на значительные расстояния в качестве потребителей не рассматривались.

Поскольку статистические данные о потреблении тепловой энергии, особенно на уровне муниципалитетов, весьма ограниченно представлены в открытом доступе, в работе была использована упрощенная методика оценки потребления энергии в зданиях и сооружениях на основе СНиП «Тепловая защита зданий» [Тепловая защита..., 2004]. Удельное (на единицу жилой площади) потребление тепловой энергии складывается из отопления, горячего водоснабжения и компенсации потерь тепла на вентиляцию. На основе рассчитанной величины градусо-суток отопительного периода (ГСОП) и среднего приведенного коэффициента теплопередачи для единицы площади совокупной ограждающей поверхности зданий ($0,55 \text{ Вт/м}^2$) определялась потребляемая тепловая энергия на отопление [Энергетика..., 2011; Гашо, 2016]. При оценке суммарной площади ограждающих поверхностей жилых помещений были использованы региональные данные о численности городского и сельского населения в рассматриваемых субъектах, нормах жилой площади и доли централизованно отапливаемых площадей [База данных..., 2023].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Суммарные потенциалы производства тепловой энергии из отходов трех основных видов сельскохозяйственных культур в Краснодарском крае и Ростовской области близки по величине и приблизительно в два раза превышают потенциал отходов Ставропольского края (табл. 2). При этом соотношение вклада отходов отдельных культур в возможное производство тепла различно. В Краснодарском крае из соломы зерновых можно получить в два раза больше тепловой энергии, чем из отходов кукурузы, и в 1,5 раза больше, чем из отходов подсолнечника. В Ростовской области максимальным тепловым потенциалом обладают отходы подсолнечника, энергетическое содержание которых по теплу превосходит таковое от соломы на 16% и почти в семь раз превышает возможность получения тепла от кукурузных остатков. В Ставропольском крае также наибольшим потенциалом производства тепловой энергии обладают отходы зерновых (солома), которые в два раза выше потенциала отходов подсолнечника и приблизительно в четыре раза выше кукурузы. Это различие в абсолютных значениях и структуре потенциалов производства тепло-

вой энергии определяется объемами и структурой отходов и, в конечном счете, посевными площадями и урожайностью этих культур в рассмотренных регионах.

Результаты оценки потенциала производства тепловой энергии из отходов растениеводства для муниципальных образований исследуемых субъектов представлены на рис. 1–3. Определены муниципальные районы с потенциалом производства те-

пловой энергии более 4,2 млн ГДж/год (1 млн ГКал) в Краснодарском крае (Ейский, Каневский, Кореновский, Кушевский, Ленинградский, Новокубанский, Новопокровский, Павловский, Тихорецкий), в Ростовской области (Азовский, Егорлыкский, Зерноградский, Кашарский, Матвеево-Курганский, Миллеровский, Неклиновский, Целинский) и в Ставропольском крае (Красногвардейский, Ипатовский и Новоалександровский).

Таблица 2

Суммарный валовый и технический потенциалы отходов производства зерновых, подсолнечника и кукурузы в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях (по данным на 2019 г.)
[Валовый сбор..., 2023]

Субъект РФ	Валовый потенциал, млн т у. т./год				Технический потенциал (тепловая энергия) (млн ГДж/год)				Отношение технического к валовому
	Солома	Кукуруза	Подсолнечник	Сумма	Солома	Кукуруза	Подсолнечник	Сумма	
Краснодарский край	5,9	1,4	2,0	9,3	59,64	28,56	39,48	127,68	0,47
Ростовская область	5,1	0,4	3,0	8,6	51,66	8,82	61,74	122,22	0,48
Ставропольский край	3,6	0,4	0,8	4,8	36,54	7,98	16,8	61,32	0,43

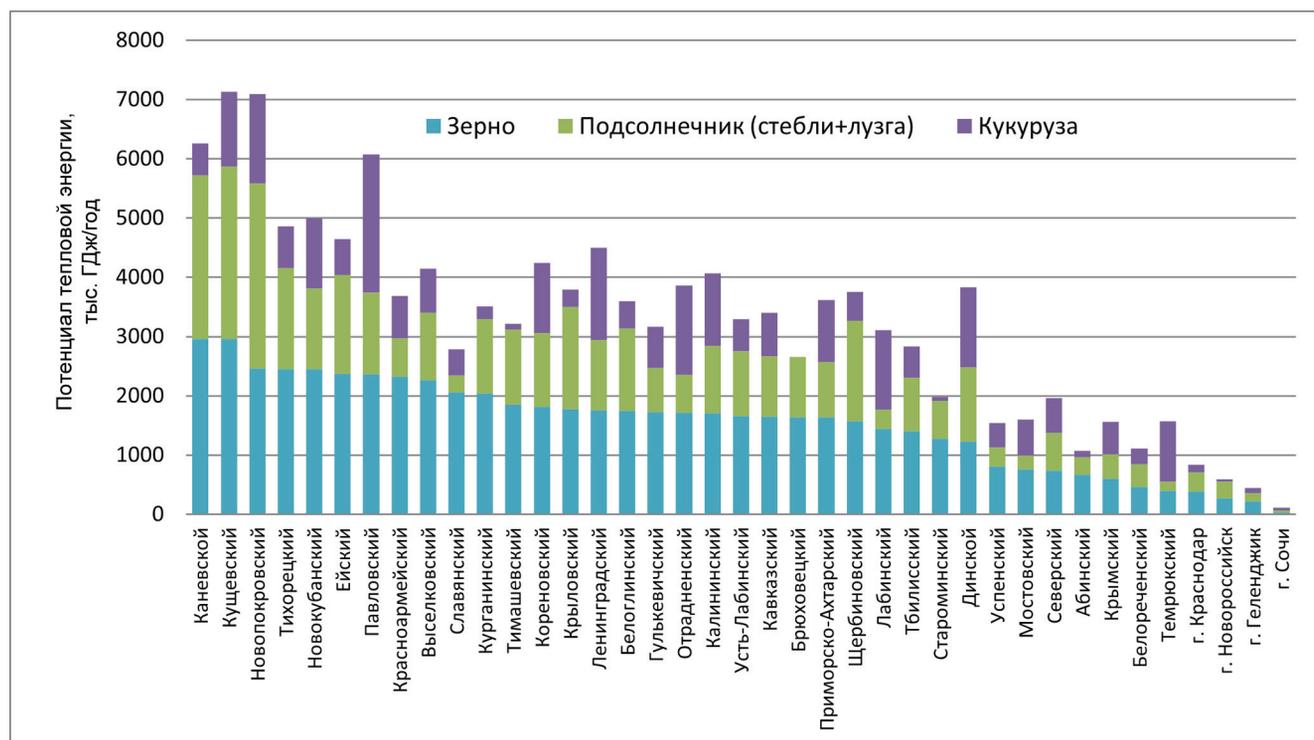


Рис. 1. Технический потенциал производства тепловой энергии из отходов растениеводства по данным 2019 г. для муниципальных образований Краснодарского края

Fig. 1. Technical potential for the production of thermal energy from crop waste according to 2019 data for the municipalities of the Krasnodar region

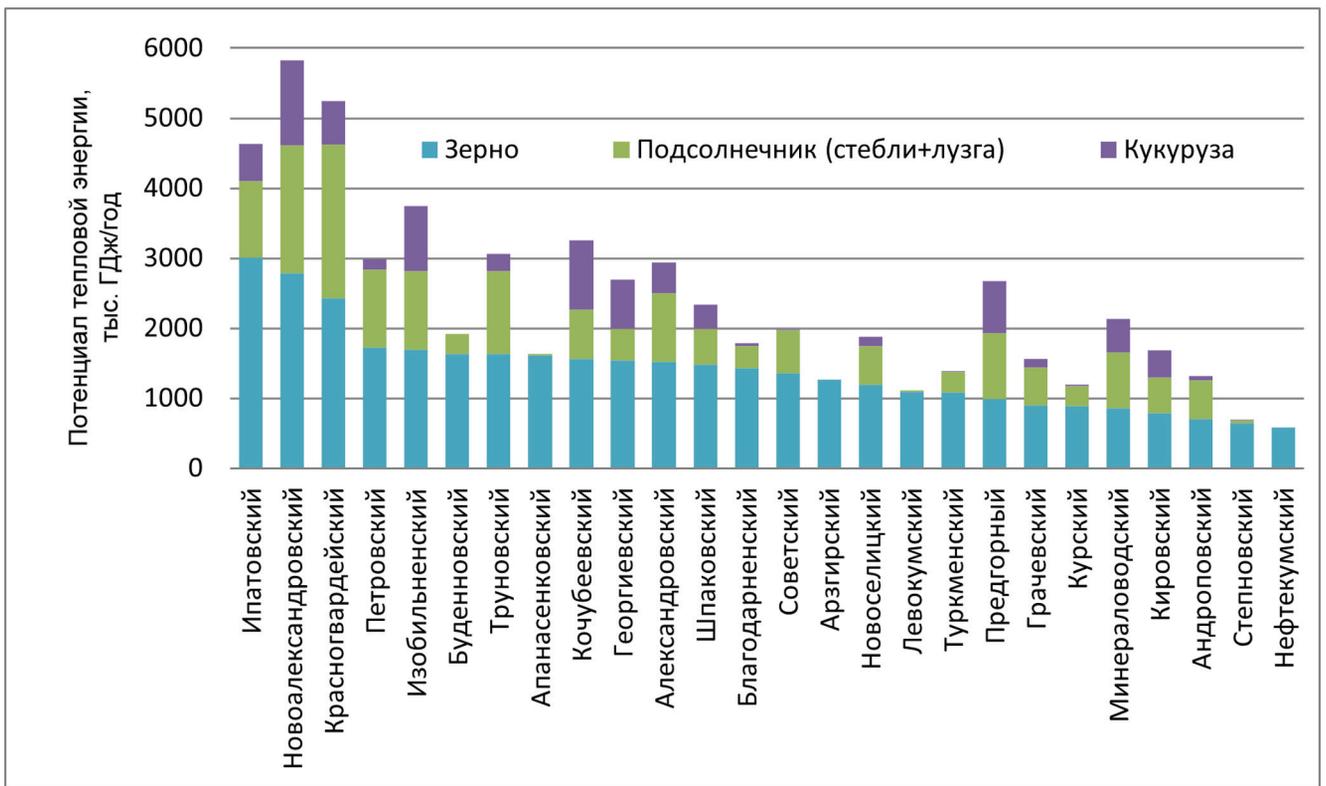


Рис. 2. Технический потенциал производства тепловой энергии из отходов растениеводства по данным 2019 г. для муниципальных образований Ставропольского края

Fig. 2. Technical potential for the production of thermal energy from crop waste according to 2019 data for the municipalities of the Stavropol' region

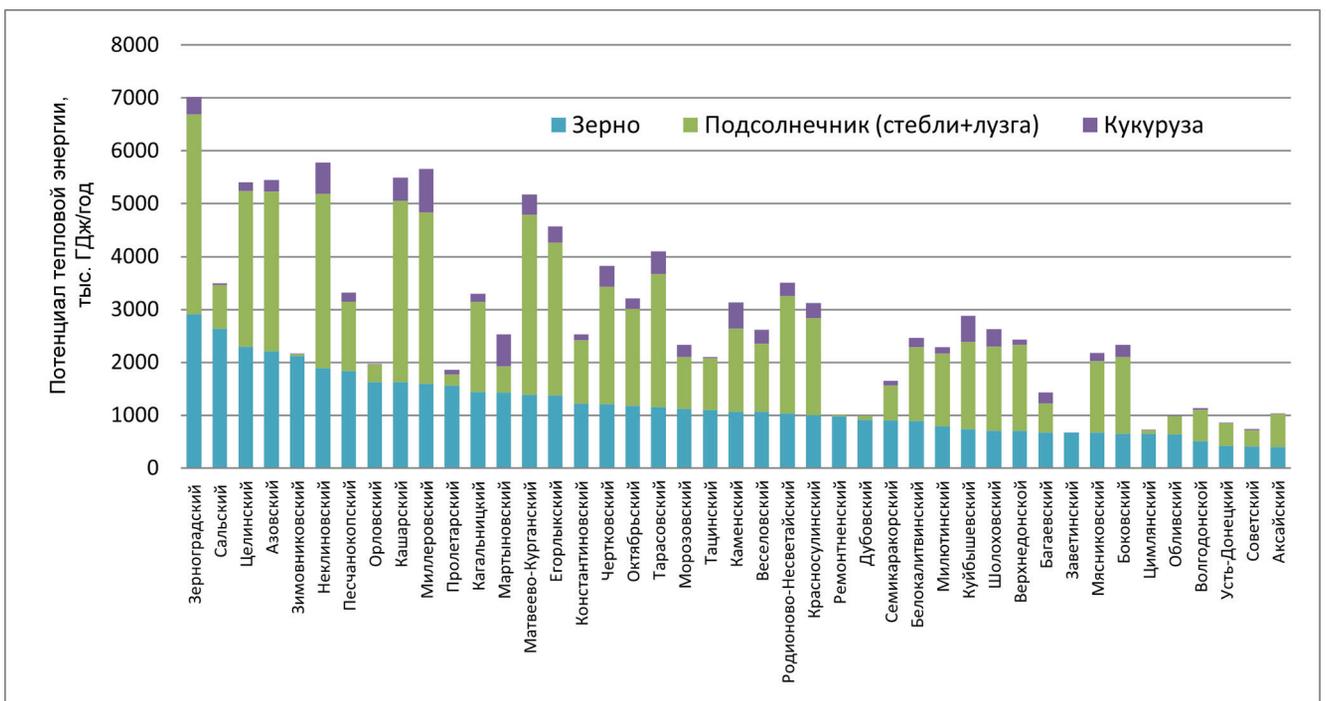


Рис. 3. Технический потенциал производства тепловой энергии из отходов растениеводства по данным 2019 г. для муниципальных образований Ростовской области

Fig. 3. Technical potential for the production of thermal energy from crop waste according to 2019 data for the municipalities of the Rostov region

Видно, что, за исключением Ростовской области, в большинстве районов преобладающим источником отходов являются зерновые культуры. В ряде муниципальных районов солома – абсолютно доминирующий вид отходов (например, Красноармейский, Курганинский районы Краснодарского края, Ипатовский район Ставропольского края) или даже единственный (в Ставропольском крае – Апанасенковский, Арзгирский, Левокумский, Степновский, Нефтекумский районы; в Ростовской области – Зимовниковский, Ремонтненский, Дубовский, Заветинский, Цимлянский). В большинстве районов Ростовской области с соломой конкурируют отходы подсолнечника. Такая специфика распределения ресурсного потенциала и его структуры может существенно влиять на дальнейший анализ экономических факторов, связанных с технологиями переработки того или иного вида отходов в энергию, а также с моделированием логистических цепочек от сбора отходов на полях до места их переработки.

Для оценки значимости технического потенциала производства тепловой энергии из сельскохозяйственных отходов для каждого субъекта были рассчитаны потребление тепловой энергии за отопительный сезон в жилищном секторе муниципалитетов на основе методики, описанной выше, а также доля покрытия тепловой нагрузки (потребления тепла) за счет использования сельскохозяйственных отходов – потенциал замещения (табл. 3). При этом в расчетах технического потенциала учтено использование соломы зерновых для других целей сельскохозяйственного производства (подстилочный материал в животноводстве, поддержание плодородия почвы и др.); в результате только половина валового энергопотенциала соломы учитывалась при расчетах производимой тепловой энергии. В связи со значительным опытом использования соломы для получения энергии, а также наличием, в том числе на российском рынке, готового оборудования, солома была далее рассмотрена как наиболее перспективный энергоноситель в рамках внутрорегионального анализа.

Таблица 3

Потенциал замещения потребления тепловой энергии в жилом секторе регионов Юга России энергией отходов растениеводства

Регион	Потребление тепла в жилищном секторе, млн ГДж/год	Технический потенциал производства тепловой энергии от отходов растениеводства, млн ГДж/год			Доля покрытия потребления тепловой энергии в жилом секторе региона, %			
		Солома зерновых	Отходы производства кукурузы	Отходы производства подсолнечника	Солома зерновых	Отходы производства кукурузы	Отходы производства подсолнечника	Суммарно
Краснодарский край	105,9	59,68	28,73	39,69	56	27	37	120
Ростовская область	76,86	52,58	8,99	61,78	68	12	81	160
Ставропольский край	49,52	36,41	8,11	16,97	74	16	34	124

Анализ пространственного распределения результатов на рис. 4–6 позволяет определить наиболее перспективные районы, которые одновременно обладают высоким энергопотенциалом (выше среднего по всем регионам, который составляет более 1680 тыс. ГДж/год), способным покрывать теплопотребление в жилом секторе (доля замещения больше 1). В Краснодарском крае это девять районов. Ростовская область характеризуется чуть более низкими значениями технического энергопотенциала отходов зерновых, но при этом более высоким числом районов с долей покрытия нагрузки теплоснабжения более 100%. В этом субъекте наиболее пер-

спективными являются районы, граничащие друг с другом и расположенные в южной части области. В Ставропольском крае энергопотенциал отходов зерновых более низкий, высокие значения имеют только пять районов. Тем не менее многие районы края способны покрыть потребности в теплоснабжении за счет этих отходов вследствие более низкой численности населения (см. рис. 6). Важно, что муниципальные районы с высокой долей покрытия нагрузки потребления во всех трех субъектах граничат друг с другом, образуя территориальное «ядро» производителей зерновых и обладающих высоким энергопотенциалом отходов.

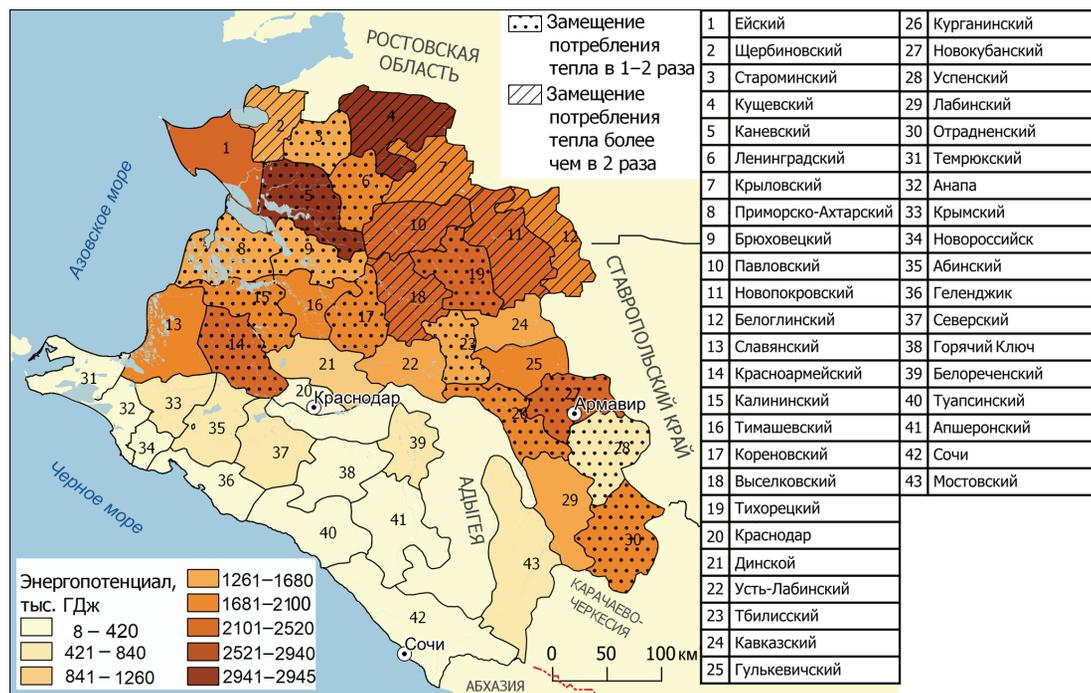


Рис. 4. Потенциал производства энергии из отходов зерновых (соломы) для муниципальных образований Краснодарского края

Fig. 4. Potential of energy production from grain waste (straw) for the municipal districts of the Krasnodar region

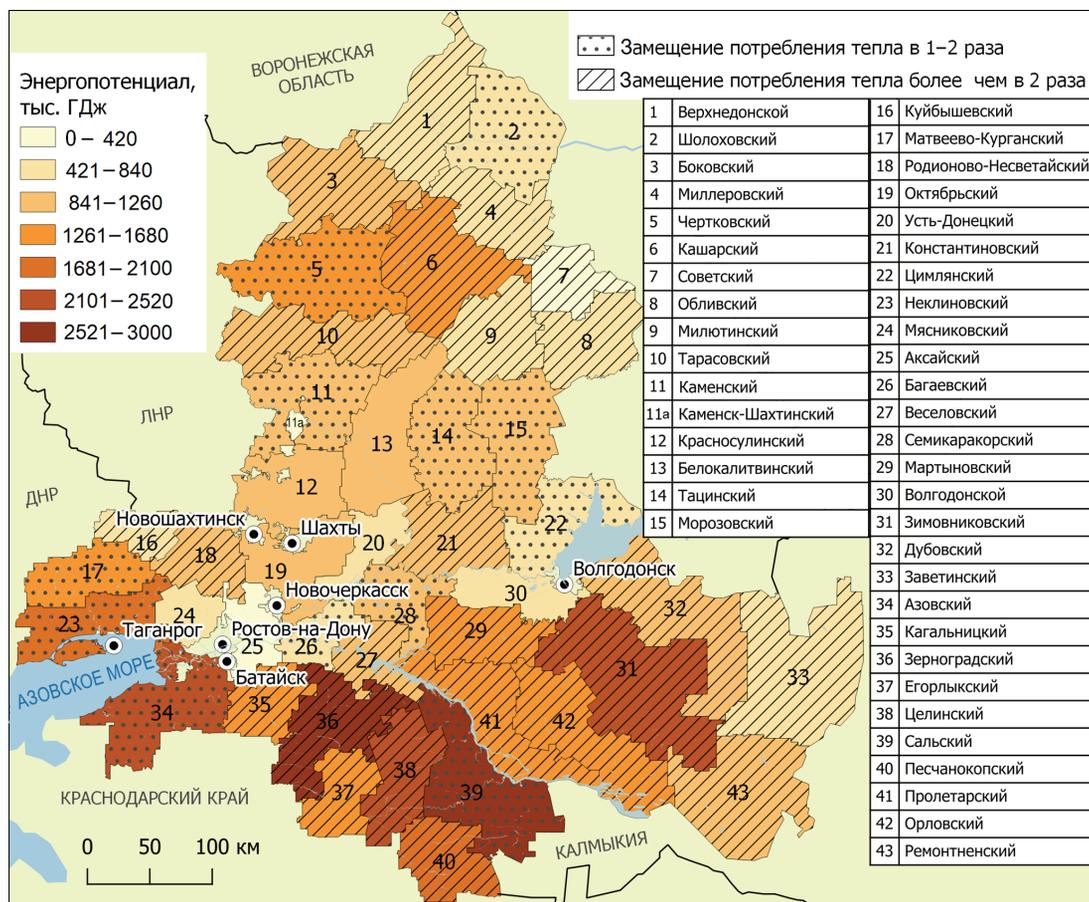


Рис. 5. Потенциал производства энергии из отходов зерновых (соломы) для муниципальных образований Ростовской области

Fig. 5. Potential for energy production from grain waste (straw) for the municipal districts of the Rostov region

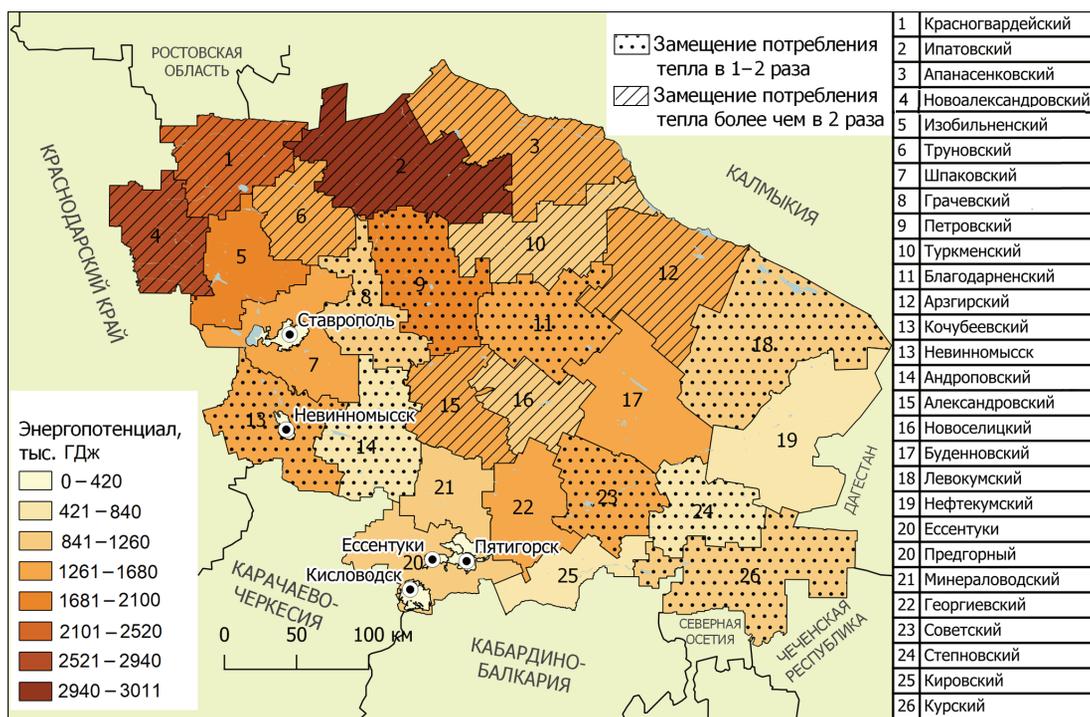


Рис. 6. Потенциал производства энергии из отходов зерновых (соломы) для муниципальных образований Ставропольского края

Fig. 6. Potential for energy production from grain waste (straw) for the municipal districts of the Stavropol region

Полученные оценки технического потенциала позволили выполнить кластерный анализ муниципальных образований по доле покрытия нагрузки или потенциалу замещения потребления тепловой энергии в жилом секторе за счет отходов зерновых (табл. 4). Под потенциалом замещения в данном случае подразумевается отношение тепловой энергии, которую возможно получить из соломы, к ежегодному потреблению этой энергии в жилом секторе. Кластеризация выполнялась методом k -средних по двум параметрам: доле покрытия нагрузки (потребления тепловой энергии в жилом секторе) и численности населения. Процедура позволила разделить муниципальные районы на четыре кластера (см. табл. 4).

Для более детального пространственного анализа результатов кластеризации была составлена комплексная карта (рис. 7). На карте обозначено ядро наиболее перспективных, граничащих друг с другом районов всех трех регионов с высоким уровнем обеспеченности отходами зерновых с численностью населения от 6200 до 72 000 чел. (кластер 4) и отдельные районы с более высокой численностью населения 80 000–147 000 чел. (кластер 3). Районы кластера 2 с недостаточными ресурсами соломы для обеспечения собственных нужд теплоснабжения в пространственном отношении расположены довольно разрозненно. Их перспективность с точки

зрения использования отходов соломы как энергетического ресурса может существенно зависеть от анализа экономических параметров и возможности транспортировки отходов того же вида из близлежащих районов с избыточным потенциалом. К таким территориям – «реципиентам» топливных ресурсов в Ростовской области можно отнести Волгоградской район (собственные возможности замещения потребления тепла энергией из местных отходов зерновых в этом районе 0,9), а также север Белокалитвинского района (0,6).

В Краснодарском крае для Ейского района (0,93) потенциальным (и единственным) «донором» отходов может являться Щербиновский район (2,58). Кавказский (0,71) и Гулькевичский (0,94) районы могут рассматривать возможности доставки соломы из Новопокровского (3,36) и Белоглинского районов (3,33) Краснодарского края и Новоалександровского (2,52) района Ставропольского края. Буденновский район (0,81) Ставропольского края может быть потенциально обеспечен ресурсами соломы за счет доставки недостающих объемов топлива из Арзгирского (3,32). В целом проведенный анализ подтверждает, что солома в исследованных регионах может представлять интерес именно как местный ресурс для целей энергообеспечения населения преимущественно сельских территорий.

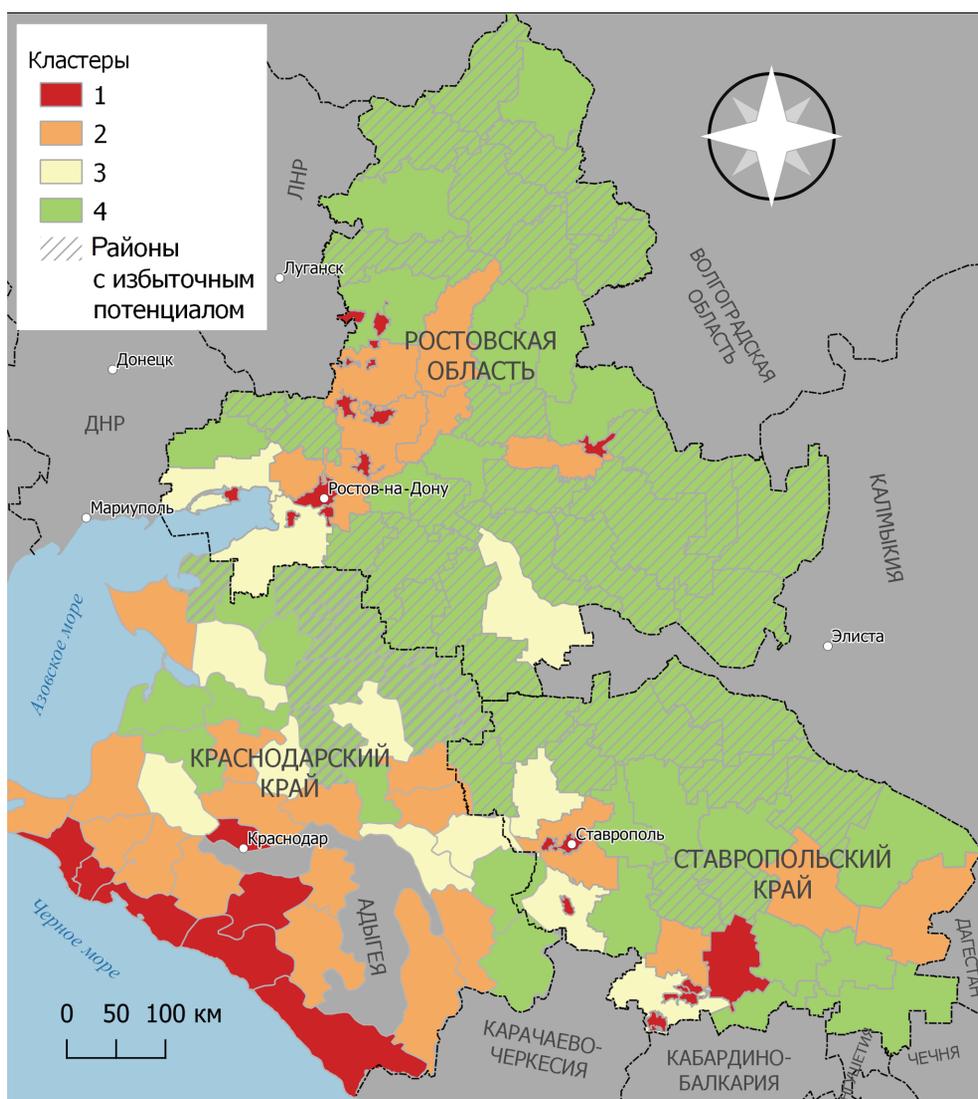


Рис. 7. Пространственное распределение потенциала энергозамещения (тепловая энергия) за счет использования отходов зерновых для Краснодарского края, Ростовской области и Ставропольского края

Fig. 7. Spatial distribution of alternative energy potential (thermal energy) through the use of grain waste for the Krasnodar, Rostov and Stavropol regions

ВЫВОДЫ

Отходы растениеводства все в большей степени привлекают внимание к использованию в целях энергоснабжения во многих регионах мира. Для оценки ресурсов и энергопотенциалов разработаны и используются общие методологические подходы, которые учитывают урожайность, долю отходов и их энергосодержание в привязке к типу сельскохозяйственных культур и местных условий.

В России для энергоснабжения используется в основном древесная биомасса (как в виде древесного топлива – пеллет и брикетов, так и в виде лесосечных отходов – щепы, опилок). Однако в силу растущих объемов сельскохозяйственного производства и необходимости оптимальной утилизации значительного количества отходов актуальными

(и в ряде случаев реализованными) являются проекты энергоснабжения на основе топлива из отходов различных отраслей растениеводства – в основном для производства тепла.

Наибольшими объемами производства зерновых, подсолнечника и кукурузы характеризуются Краснодарский и Ставропольский края и Ростовская область, где суммарный технический энергопотенциал отходов этих культур достигает в максимуме (Краснодарский край) 128,1 млн ГДж/год. Наибольшим потенциалом замещения потребностей регионов в теплоснабжении жилого сектора за счет отходов растениеводства характеризуется Ростовская область (160%). При этом во всех исследованных регионах основным ресурсом для производства энергии можно рассматривать отходы зерновых (солому).

Результаты кластеризации районов Ростовской области, Краснодарского и Ставропольского краев

	Краснодарский край	Ставропольский край	Ростовская область	Примечание
Кластер 1: население – более 165 000 человек; по- тенциал замещения потребления тепла – 0	Краснодар, Новоросийск, Сочи, Армавир, Анапа, Туапсинский, Геленджик, Горячий Ключ	Ростов-на-Дону, Волгодонск, Новочеркасск, Таганрог, Шахты, Азов, Багайск, Каменск- Шахтинский, Новошахтинск, Гуково, Донецк, Зверево	Ставрополь, Пятигорск, Железнодорож, Лермонтов, Георгиевский, Ессентуки, Кисловодск, Невинномысск	Энергия из соломы не способна покрыть потребности жилого сектора
Кластер 2: население – 6200– 147 000 человек; по- тенциал замещения по- требления тепла – 0–1	Абинский, Апшеронский, Белореченский, Гулькевичский, Динской, Ейский, Кавказский, Крымский, Лабинский, Мостовский, Северский, Славянский, Темрюкский, Тимашевский, Усть-Лабинский	Буденновский, Шпаковский, Минераловодский, Нефтекумский	Акайский, Белокалитвинский, Волгодонской, Красносулинский, Мясниковский, Октябрьский, Усть-Донецкий, Целинский	Энергия из соло- мы может служить дополнительным топливным ресур- сом для отдельных территорий внутри районов
Кластер 3: население – 80 000– 147 000 человек; по- тенциал замещения по- требления тепла – 1–2	Каневской, Кореновский, Красноармейский, Курганинский, Новокубанский, Тихорецкий	Кочубеевский, Предгорный, Изобильненский	Азовский, Неклиновский, Сальский	Избыточный энерго- потенциал соломы
Кластер 4: население 6200–72 000 человек; потенциал за- мещения потребления тепла – более 1	Белоглинский, Брюховецкий, Выселковский, Калининский, Крыловский, Кушевский, Ленинградский, Новопокровский, Отраденский, Павловский, Приморско-Ахтарский, Староминский, Тбилисский, Успенский, Щербиновский	Александровский, Апанасенковский, Арзирский, Грачевский, Красногвардейский, Андроповский, Курский, Левокумский, Новоселицкий, Степновский, Труновский, Туркменский, Благодарненский, Ипатовский, Кировский, Новоалександровский, Петровский, Советский	Багаевский, Боковский, Верхнедонской, Веселовский, Дубовский, Егорлыкский, Заветинский, Зерноградский, Зимовниковский, Кагальницкий, Каменский, Кашарский, Константиновский, Куйбышевский, Мартыновский, Матвеево-Курганский, Миллеровский, Милотинский, Морозовский, Обливский, Орловский, Песчанокопский, Пролетарский, Ремонтненский, Родионово-Несветайский, Семикаракорский, Советский, Тарасовский, Тащинский, Цимлянский, Чертковский, Шолоховский	Могут не только обе- спечивать энергией из соломы собствен- ные нужды, но и являются потенци- альными донорами топлива для близле- жащих районов

Расчеты и анализ энергопотенциала отходов трех видов сельскохозяйственных культур (зерновых, подсолнечника, кукурузы) на внутрирегиональном уровне позволили выявить районы с высоким потенциалом производства тепловой энергии – более 4,2 млн ГДж/год. Так, в Краснодарском крае это пороговое значение превышено в девяти районах, в Ростовской области – в восьми, в Ставропольском крае – в трех. Наиболее перспективными с точки зрения использования отходов зерновых в производстве энергии предложено считать муниципальные районы с высоким энергопотенциалом и долей покрытия тепловой нагрузки в жилом секторе (потенциалом замещения) более 1.

Кластеризация исследуемых районов методом *k*-средних позволила выделить четыре кластера: 1) районы с высокой численностью населения (более 165 000 чел.), где потенциал замещения тепловой энергией близок к 0; 2) районы с численностью населения 6200–147 000 чел. и потенциалом замещения 0–1, которые могут рассматриваться как потенциально перспективные при возможности транспортировки дополнительных ресурсов соломы из соседних районов-доноров; 3) районы с численностью населения 80 000–147 000 чел. и потенциалом покрытия потребностей жилого сектора 1–2; 4) районы с численностью населения 6200–72 000 чел. и избыточными отходами соломы, которые могут рассматриваться как районы-доноры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / Т.И. Андреев и др. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 160 с.
- Клюс С.В., Забарный Г.Н. Оценка и прогноз потенциала твердого биотоплива Украины // Коллекторное и энергетическое машиностроение. 2011. № 2(24). С. 8–13.
- Передерий С. Солома для денег или деньги из соломы. Производство и сжигание гранулированных отходов растениеводства // ЛесПромИнформ. 2010. № 4(70). С. 148–150.
- Ракитова О.С. Каким быть топливу будущего // ЛесПромИнформ. 2021. № 3(157). С. 116–121.
- Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива / под ред. П.П. Безруких. М.: ИАЦ Энергия, 2007. 272 с.
- Тепловая защита зданий. СНиП 23-02-2003. М.: Государственный комитет РФ по строительству и жилищно-коммунальному комплексу, 2004. 26 с.
- Энергетика в современном мире / В.Е. Форгов, О.С. Попель. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2011. 167 с.
- Ryan P., Openshaw K. Assessment of biomass energy resources – a discussion on its need and methodology, D.C.: World Bank Group Industry and Energy Department, 1991.
- Bentsen N.S., Felby C. Biomass for energy in the European Union – a review of bioenergy resource assessments, *Biotechnology for Biofuels*, 2012, vol. 5, no. 25, DOI: 10.1186/1754-6834-5-25.
- Fraia S.D., Fabozzi S., Macaluso A., Vanoli L. Energy potential of residual biomass from agro-industry in a Mediterranean region of southern Italy (Campania), *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 277, no. 124085, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124085.
- Berndes G., Hoogwijk M., Broek van den R. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, *Biomass and Bioenergy*, 2003, vol. 25, iss. 1, p. 1–28, DOI: 10.1016/S0961-9534(02)00185-X.
- Guler D., Battenfield B.P., Charisoulis G., Yomralioglu T. Comparative analysis of bioenergy potential and suitability modeling in the USA and Turkey, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 53, part C, 10262, DOI: 10.1016/j.seta.2022.102626.
- Guo H., Cui J., Li J. Biomass power generation in China: Status, policies and recommendations, *Energy Reports*, 2022, no. 8(13), p. 687–696.
- Karan S.K., Hamelin L. Crop residues may be a key feedstock to bioeconomy but how reliable are current estimation methods? *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 164, 105211, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105211.
- Kpalo S.Y., Zainuddin M.F., Manaf L.A. et al. Techno-Economic Viability Assessment of a Household Scale Agricultural Residue Composite Briquette Project for Rural Communities in Nigeria, *Sustainability*, 2022, vol. 14, 9399, DOI: 10.3390/su14159399.
- Bilandzija N., Voca N., Jelcic B. et al. Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 93, p. 225–230, DOI: 10.5937/JPEA1701032B.
- Ruiz P., Nijis W., Tarydas D. et al. ENSPRESO an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials, *Energy Strategy Reviews*, 2019, vol. 26, 100379, DOI: 10.1016/j.esr.2019.100379.
- Offermann R., Seidenberger T., Thrän D. et al. Assessment of global bioenergy potentials, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2011, vol. 16, p. 103–115, DOI: 10.1186/1754-6834-5-25.
- Sliz-Szkliniarz B., Vogt J. A GIS-based approach for evaluating the potential of biogas production from livestock manure and crops at a regional scale: A case study for the Kujawsko-Pomorskie Voivodeship, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 2012, p. 752–763.
- Somerville C. The billion-ton biofuels vision, *Science*, 2006, vol. 312(5778), 1277, DOI: 10.1126/science.1130034.
- Jolli D., Giljum S. Unused biomass extraction in agriculture, forestry and fishery, Sustainable Europe Research Institute (SERI), 2005, no. 3, 40 p.
- Электронные ресурсы
База данных показателей муниципальных образований // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst> (дата обращения 01.03.2023).

- Валовый сбор сельскохозяйственных культур // Единая межведомственная информационно-статистическая система. URL: <https://fedstat.ru/indicator/30950> (дата обращения 01.03.2023).
- Валовой сбор сельскохозяйственных культур по категориям хозяйств в хозяйствах всех категорий / Единая межведомственная информационно-статистическая система. 2022. URL: <https://fedstat.ru/indicator/30950> (дата обращения 28.02.2023).
- Володарец И.В. Энергия биомассы. Энергетическая утилизация отходов агропереработки. 2021. URL: <https://1-engineer.ru/energeticheskaya-utilizaciya-otvodov-agropereobrabotki/> (дата обращения 28.02.2023).
- Гашио Е.Г. Выявление и реализации резервов повышения эффективности систем теплоэнергоснабжения городов и регионов: URL: https://mpei.ru/Structure/Universe/peep/structure/hamapai/enmie/Documents/konferense_2016/Gasho.pdf (дата обращения 01.03.2023).
- Площади многолетних насаждений в Российской Федерации // Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения 28.02.2023).
- Danish energy sector: TPES and features of bioenergy development, URL: <https://uabio.org/en/materials/12037/> (дата обращения 28.02.2023).
- Koppejan J. Agricultural and forest residues – generation, utilization and availability, Paper presented at the regional consultation on modern applications of biomass energy, 1997, Kuala Lumpur, Malaysia, URL: https://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/p_residues.pdf (дата обращения 28.02.2023).
- REN21 Global Status Report, 2022, URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf#page=101&zoom=100,0,0 (дата обращения 28.02.2023).

Поступила в редакцию 27.08.2022

После доработки 25.03.2023

Принята к публикации 27.07.2023

ENERGY POTENTIAL OF AGROBIOMASS IN KRASNODAR, STAVROPOL AND ROSTOV REGIONS

T.I. Andreenko¹, S.V. Kiseleva², Yu.Yu. Rafikova³

¹⁻³ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Renewable Energy Sources*

¹ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: tanyandr00@mail.ru*

² *Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: k_sophia_v@mail.ru*

³ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ju.rafikova@mail.ru*

At present the use of organic waste for energy production has become a significant part of the world energy industry. Thereby both the problem of energy supply and waste disposal are solved. In connection with the large volumes of annually formed resource, the ability to provide inexpensive logistics and the demand for energy at the level of local consumption the task of recycling agricultural waste is of particular interest. The paper presents a methodology for assessing the crop waste energy potential, taking into account the type of crops, the energy content and specific features of their processing to produce thermal energy. The regions of the Russian Federation leading in the production of cereals, sunflower and corn, i. e. Stavropol Territory, Krasnodar Territory and Rostov Region, were chosen as study areas, both due to the significant energy potential and the available experience of producing energy from wastes in the South of Russia. The quantities of thermal energy that can be obtained from the waste of these crops are determined (the totals for all crops are 14 600 000, 30 500 000 and 29 100 000 million Gcal/year for the regions, respectively), as well as the share of heat supply coverage in the residential sector of the regions (124, 120 and 160%, respectively). The cluster analysis methods allowed identifying groups of districts that are self-sufficient in terms of the local energy resource, as well as potential “donors” of fuel from waste. The results are displayed on charts and a series of maps.

Keywords: bioenergy, agricultural waste, resources, energy supply potential

REFERENCES

- Assessment of biomass energy resources – a discussion on its need and methodology*, P. Ryan, K. Openshaw, D.C., World Bank Group Industry and Energy Department, 1991.
- Atlas resursov vozobnovlyаемой энергии на территории России: nauch. izdanie* [Atlas of Renewable Energy Resources in Russia: scientific edition], T.I. Andreenko et al., Moscow, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia Publ., 2015, 160 p. (In Russian)
- Bentsen N.S., Felby C. Biomass for energy in the European Union – a review of bioenergy resource assessments, *Biotechnology for Biofuels*, 2012, vol. 5, no. 25, DOI: 10.1186/1754-6834-5-25.
- Energetika v sovremennom mire* [Energy in the modern world], V.E. Fortov, O.S. Popel'. Dolgoprudnyi, Intellect Publ., 2011, 167 p. (In Russian)

- Fraia S.D., Fabozzi S., Macaluso A., Vanoli L. Energy potential of residual biomass from agro-industry in a Mediterranean region of southern Italy (Campania), *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 277, no. 124085, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124085.
- Berndes G., Hoogwijk M., Broek van den R. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, *Biomass and Bioenergy*, 2003, vol. 25, iss. 1, p. 1–28, DOI: 10.1016/S0961-9534(02)00185-X.
- Guler D., Battenfield B.P., Charisoulis G., Yomralioglu T. Comparative analysis of bioenergy potential and suitability modeling in the USA and Turkey, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 53, part C, 10262, DOI: 10.1016/j.seta.2022.102626.
- Guo H., Cui J., Li J. Biomass power generation in China: Status, policies and recommendations, *Energy Reports*, 2022, no. 8(13), p. 687–696.
- Karan S.K., Hamelin L. Crop residues may be a key feedstock to bioeconomy but how reliable are current estimation methods? *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 164, 105211, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105211.
- Klyus S.V., Zabarnyi G.N. Otsenka i prognoz potentsiala tverdogo biotopliva Ukrainy [Assessment and forecast of the potential of solid biofuels in Ukraine], *Kollektor-noe i energeticheskoe mashinostroenie*, 2011, no. 2(24), p. 8–13. (In Russian)
- Kpalo S.Y., Zainuddin M.F., Manaf L.A. et al. Techno-Economic Viability Assessment of a Household Scale Agricultural Residue Composite Briquette Project for Rural Communities in Nigeria, *Sustainability*, 2022, vol. 14, 9399, DOI: 10.3390/su14159399.
- Bilanzdžija N., Voca N., Jelcic B. et al. Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 93, p. 225–230, DOI: 10.5937/JPEA1701032B.
- Offermann R., Seidenberger T., Thrän D. et al. Assessment of global bioenergy potentials, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2011, vol. 16, p. 103–115, DOI: 10.1186/1754-6834-5-25.
- Perederii S. Soloma dlya deneg ili den'gi iz solomy. Proizvodstvo i szhiganie granulirovannykh otkhodov rastenievodstva [Straw for money or money from straw. Production and incineration of granulated crop waste], *LesPromInform*, 2010, no. 4(70), p. 148–150. (In Russian)
- Rakitova O.S. Kakim byt' toplivu budushchego [What will be the fuel of the future], *LesPromInform*, 2021, no. 3(157), p. 116–121. (In Russian)
- Ruiz P., Nijs W., Tarvydas D. et al. ENSPRESO an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials, *Energy Strategy Reviews*, 2019, vol. 26, 100379, DOI: 10.1016/j.esr.2019.100379.
- Sliz-Szkliniarz B., Vogt J. A GIS-based approach for evaluating the potential of biogas production from livestock manure and crops at a regional scale: A case study for the Kujawsko-Pomorskie Voivodeship, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, p. 752–763.
- Somerville C. The billion-ton biofuels vision, *Science*, 2006, vol. 312(5778), no. 1277, DOI: 10.1126/science.1130034.
- Spravochnik po resursam vozobnovlyаемых istochnikov energii Rossii i mestnym vidam topliva* [Guide to Russia's Renewable Energy Resources and Local Fuels], Bezrukikh P.P. et al. Moscow, Publishing and Analytical Center "Energia", 2007, 272 p. (In Russian)
- Teplovaya zashchita zdaniy. SNiP 23-02-2003* [Thermal protection of buildings. Code of Norms and Rules 23-02-2003], Moscow, State Committee of the Russian Federation for Construction and Housing and Communal Complex, 2004, 26 p. (In Russian)
- Unused biomass extraction in agriculture, forestry and fishery*, Jolli D., Giljum S., Sustainable Europe Research Institute (SERI), 2005, 40 p.
- Web sources*
- Baza dannykh pokazatelei munitsipal'nykh obrazovaniy, Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki [Database of indicators of municipalities, Federal State Statistics Service], URL: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst> (access date 01.03.2023).
- Danish energy sector: TPES and features of bioenergy development, URL: <https://uabio.org/en/materials/12037/> (access date 28.02.2023).
- Gasho E.G. Vyyavlenie i realizatsii rezervov povysheniya effektivnosti sistem teploenergostonabzheniya gorodov i regionov [Identification and implementation of reserves to improve the efficiency of heat and power supply systems of cities and regions], URL: https://mpei.ru/Structure/Universe/peep/structure/hamepai/enmie/Documents/konferense_2016/Gasho.pdf (access date 01.03.2023).
- Koppejan J. Agricultural and forest residues – generation, utilization and availability, Paper presented at the regional consultation on modern applications of biomass energy, 1997, Kuala Lumpur, Malaysia, URL: https://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/p_residues.pdf (access date 28.02.2023).
- Ploshchadi mnogoletnikh nasazhdeniy v Rossiiskoi Federatsii, Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki [Areas of perennial plantations in the Russian Federation, Federal State Statistics Service], URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (access date 28.02.2023).
- REN21 Global Status Report, 2022, URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf#page=101&zoom=100,0,0 (access date 28.02.2023).
- Valovoi sbor sel'skokhozyaistvennykh kul'tur po kategoriyam khozyaistv v khozyaistvakh vsekh kategoriy, Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya Sistema, 2022, [Gross harvest of agricultural crops, Unified interdepartmental information and statistical system], URL: <https://fedstat.ru/indicator/30950> (access date 28.02.2023).
- Valovyi sbor sel'skokhozyaistvennykh kul'tur, Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya Sistema, URL: <https://fedstat.ru/indicator/30950> (access date 01.03.2023).
- Volodarets I.V. Energiya biomassy. Energeticheskaya utilizatsiya otkhodov agropromyshlennoy promyshlennosti [Biomass energy. Energy utilization of agricultural waste], 2021, URL: <https://1-engineer.ru/energeticheskaya-utilizatsiya-otkhodov-agropromyshlennoy-promyshlennosti/> (access date 28.02.2023).

Received 27.08.2022
Revised 25.03.2023
Accepted 27.07.2023