

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВЫСОКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИООТХОДОВ И БИОРЕСУРСОВ КАК ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ПО ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ (НА ПРИМЕРЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ)***Светлана Валерьевна РАТНЕР^а, Валерий Викторович ИОСИФОВ^б,
Мария Дмитриевна РАТНЕР^с**

^а доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экономической динамики и управления инновациями Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, профессор кафедры экономико-математического моделирования Российского университета дружбы народов (РУДН), Москва, Российская Федерация

lanaratner@ipu.ru
ORCID: отсутствует
SPIN-код: 7840-4282

^б кандидат технических наук, доцент кафедры наземного транспорта и механики, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ), Краснодар, Российская Федерация

iosifov_v@mail.ru
ORCID: отсутствует
SPIN-код: 3558-0754

^с студентка отделения геоинформатики Кубанского государственного университета (КубГУ), Краснодар, Российская Федерация

keep3up3@gmail.com
ORCID: отсутствует
SPIN-код: отсутствует

* Ответственный автор

История статьи:

Получена 07.11.2018
Получена в доработанном виде 21.11.2018
Одобрена 28.11.2018
Доступна онлайн 14.12.2018

УДК 338.2

JEL: O44, Q01

Ключевые слова:

региональная энергетическая система, энергобаланс, экологический след, анализ жизненного цикла продукции, оптимизация, моделирование

Аннотация

Предмет. Перспективы развития региональной энергетической системы за счет расширения использования традиционных энергетических технологий. Потенциал развития различных видов возобновляемых источников энергии, которые могут возместить растущий энергодефицит.

Цели. Разработка экономико-математической модели, позволяющей оптимизировать развитие региональной энергетической системы по эколого-экономическим критериям.

Методология. Для оценки экологических последствий вовлечения возобновляемых источников энергии в энергобаланс использовалась методология анализа жизненного цикла продукции в соответствии с международными стандартами ISO 14000. Для оценки экономических последствий использовалась методика «затраты-выпуск». Оптимизация энергобаланса проводилась с помощью решения задачи линейного программирования.

Результаты. При оптимизации развития региональной энергетической системы по экономическим параметрам целесообразно вовлекать в разработку биоотходы и твердые бытовые отходы (ТБО) как источники энергии, полностью используя потенциал ветровой энергетики. Солнечная генерация вовлекается в разработку по остаточному принципу. При оптимизации энергобаланса по экологическим критериям вовлечение биогазовой генерации в энергобаланс нецелесообразно.

Выводы. После полного использования потенциала переработки ТБО и ветровой энергетики разница между использованным потенциалом возобновляемых источников энергии и требуемым объемом генерации может быть восполнена за счет развития фотовольтаики.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2018

Для цитирования: Ратнер С.В., Иосифов В.В., Ратнер М.Д. Оптимизация региональной энергетической системы с высоким потенциалом использования биоотходов и биоресурсов как источников энергии по эколого-экономическим параметрам (на примере Краснодарского края) // *Региональная экономика: теория и практика*. – 2018. – Т. 16, № 12. – С. 2383 – 2398.
<https://doi.org/10.24891/re.16.12.2383>

Введение

Интенсивное экономическое развитие, рост потребления энергоресурсов, расширение городов и накопление отходов ведут к неизбежным экологическим проблемам, решение которых возможно только за счет перехода региональных энергетических систем на более экологически чистые технологии. Непрерывный рост уровня автомобилизации населения, несоблюдение стандартов автомобильного топлива, повышенные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу из-за сложной транспортной ситуации на дорогах практически всех крупных городов РФ, а также неразвитость системы переработки твердых бытовых отходов и сточных вод, накопление которых создает дополнительные экологические риски, приводят к ухудшению состояния окружающей среды, деградации природных экосистем и снижению качества жизни населения.

Так, например, в Краснодарском крае, согласно данным краевого Министерства природных ресурсов¹, выбросы от передвижных источников (преимущественно автомобильного транспорта) на протяжении последних семи лет составляют 70–80% от суммарных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. За последние четыре года интенсивность движения транспорта возросла

более чем на 25%. В летний период резко возрастает численность легкового автотранспорта за счет притока иногороднего и транзитного транспорта, направляющегося на побережье Черного и Азовского морей. При перевозке сельскохозяйственной продукции посезонно наблюдается увеличение численности грузового автомобильного транспорта.

В крае ежегодно образуется около 9 млн т твердых бытовых отходов, при этом объем отходов данного вида, с учетом роста населения края, продолжает также расти. Большой объем отходов, в том числе и высоких классов опасности, образуется на сельскохозяйственных предприятиях края, предприятиях топливно-энергетического комплекса (нефтеперерабатывающих и транспортирующих, на предприятиях электроэнергетики), предприятиях пищевой промышленности.

В то же время регион обладает значительным природно-климатическим потенциалом для активного введения в структуру энергобаланса региона «чистых» источников энергии (ветровой, солнечной, малой гидроэнергетики) и большими возможностями для развития производства различных видов биотоплива и биогаза, в том числе за счет внедрения новых технологий переработки коммунальных отходов и отходов сельскохозяйственных производств.

Особый научно-практический интерес представляют разработки, направленные на поиск путей перехода региональной экономической системы на более экологически чистые технологии производства и потребления энергии, в том числе связанные с переработкой биоотходов, без ущерба для развития экономики и сохранении (либо повышении) инвестиционной привлекательности энергетических компаний.

^{*} Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Краснодарского края, проект № 18-410-230011_a(p) «Разработка динамической модели оптимизации региональной энергетической системы с высоким потенциалом использования биоотходов и биоресурсов как источников энергии по эколого-экономическим параметрам (на примере Краснодарского края)».

¹ Ежегодный доклад о состоянии природопользования и об охране окружающей среды Краснодарского края. URL: <http://mprkk.ru/ob-okruzhayuschej-srede/o-sostoyanii-okruzhayuschej-sredy/ezhegodnyj-doklad-o-sostoyanii-prirodopolzovaniya-i-ohrane-okruzhayuschej-sredy-i-krasnodarskogo-kraya/>

Целью настоящего исследования является разработка математической модели, позволяющей находить оптимальную структуру энергобаланса региона, имеющего потенциал частичного замещения углеводородных источников биоресурсами (отходами сельскохозяйственных и перерабатывающих производств) и отходами (сточными водами, отходами животноводства) в процессах генерации тепловой и электрической энергии, а также потребления автомобильного топлива.

В качестве основного подхода к моделированию используется линейное программирование на основе предположения о балансе спроса и предложения энергии в регионе и учета возможностей импорта и экспорта энергетических продуктов за пределы региона. Оптимизация проводится по двум основным критериям: экологическому (в упрощенном варианте учитываются только объемы выбросов парниковых газов) и экономическому (стоимость энергии для потребителя). Новизна предлагаемого подхода к моделированию оптимальной структуры энергобаланса региона заключается в использовании методологии анализа жизненного цикла (по стандарту ISO 14040) для оценки возможных экологических последствий изменений в энергобалансе региона.

Описание текущего состояния энергосистемы Краснодарского края

Как и любая другая современная энергетическая система, региональная энергосистема Краснодарского края состоит из трех основных блоков:

- производство и потребление электрической энергии;
- производство и потребление тепловой энергии;
- производство и потребление моторного топлива.

Краснодарский край является одним из трех регионов России с наибольшим дефицитом электроэнергии. Доля собственного

производства в общем объеме потребления электроэнергии в Краснодарском крае в 2017 г. составила всего 44,1% и является самой низкой в стране после показателей Москвы и Московской области. Среди промышленно развитых южных регионов России по общему объему генерации электроэнергии Краснодарский край находится на предпоследнем месте, превосходя по данному показателю только Астраханскую область (рис. 1). Однако если рассматривать производство электроэнергии в расчете на душу населения, то можно заметить, что регион по данному показателю серьезно отстает от своих ближайших соседей (рис. 2).

Производство тепловой энергии в Краснодарском крае обеспечивается работой 4 теплоэлектростанций, 2 848 котельных и 3 296 км тепловых сетей, которыми в 2017 г. было произведено всего 15 711,7 тыс. Гкал тепловой энергии (из них электростанциями – 5 316,5 тыс. Гкал, котельными – 10 394,2 тыс. Гкал, рис. 3). Общий уровень газификации котельных составляет 76%. Установленная мощность котельных теплоснабжающих предприятий составляет 5 472 Гкал/час (6 362 МВт), присоединенная нагрузка – 3 721 Гкал/час (4 327 МВт). Средний коэффициент использования установленной мощности котельных края составляет 68%.

Услугами централизованного отопления и горячего водоснабжения пользуется только треть населения края, потребляющая 72% от всей реализуемой в крае тепловой энергии. 18% всей тепловой энергии используется учреждениями и организациями бюджетной сферы².

Потребление моторного топлива в крае (по данным 2015 г.) составляет 2,3 млн т. При этом потребляется в основном топливо, производимое непосредственно в регионе. Так, пять крупных нефтеперерабатывающих предприятий края (Краснодарский НПЗ, Афицкий НПЗ, Туапсинский НПЗ, Славянский НПЗ, Ильский НПЗ) по итогам 2017 г. достигли показателя 25 414,8 тыс. т

² Данные Министерства топливно-энергетического комплекса и жилищно-коммунального хозяйства Краснодарского края. URL: <http://www.gkh-kuban.ru/>

годового объема переработки. Нефтеперерабатывающие предприятия производят бензин, зимнее и летнее дизельное топливо, топливо для реактивных двигателей, судовое топливо, мазут, дистиллят газового конденсата, малонафт, битум. Согласно данным, представленным на официальных сайтах указанных нефтеперерабатывающих предприятий, средняя глубина переработки колеблется от 77% до 85%, что позволяет оценить объемы производимого моторного топлива различных видов и классов экологичности примерно в 19,57 млн т. Такие объемы производства полностью обеспечивают даже растущий местный спрос на моторное топливо и другие виды нефтепродуктов и позволяют экспортировать продукцию за пределы региона, в том числе за рубеж.

Постановка оптимизационной задачи

Для формирования оптимизационной задачи региональной энергосистемы в первую очередь сформулируем критерии оптимизации, а именно, целевую функцию стоимости энергии для потребителя и целевую функцию негативного воздействия региональной энергосистемы на окружающую среду, в которой бы учитывались негативные эффекты всех этапов жизненного цикла энергетического продукта – от этапов добычи, производства и транспортировки до этапов непосредственного потребления и утилизации.

Представим целевую функцию суммарной стоимости всех потребляемых энергопродуктов как:

$$\sum_{i=1}^K \alpha_i V_i^H + \sum_{i=1}^M \beta_i V_i^E + \sum_{i=1}^L \gamma_i V_i^F \rightarrow \min, \quad (1)$$

где α_i – себестоимость тепловой энергии, произведенной i -ым способом; β_i – себестоимость электроэнергии, произведенной i -ым способом; γ_i – себестоимость моторного топлива, произведенного i -ым способом.

Представим целевую функцию кумулятивного негативного экологического воздействия

(в упрощенном варианте – углеродного следа)⁵ производства и потребления всех энергопродуктов как:

$$\sum_{i=1}^K (ch_i^{product} + ch_i^{cons}) V_i^H + \sum_{i=1}^M (ce_i^{product} + ce_i^{cons}) V_i^E + \sum_{i=1}^L (cf_i^{product} + cf_i^{cons}) V_i^F \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $ch_i^{product}$ – углеродный след производства единицы тепловой энергии i -ым способом; ch_i^{cons} – углеродный след потребления единицы тепловой энергии, произведенной i -ым способом; $ce_i^{product}$ – углеродный след производства единицы электрической энергии i -ым способом; ce_i^{cons} – углеродный след потребления единицы электрической энергии, произведенной i -ым способом; $cf_i^{product}$ – углеродный след производства единицы моторного топлива i -ым способом; cf_i^{cons} – углеродный след потребления единицы моторного топлива, произведенного i -ым способом.

Баланс между производством энергетических продуктов и спросом на них сформулируем с использованием следующих ограничительных условий (ограничения по функциональности):

– $\sum_{i=1}^K V_i^H \geq V_{2017}^{HP}$ – суммарный объем производства тепловой энергии из всех потенциальных источников не меньше, чем объем потребления в 2017 г.;

– $\sum_{i=1}^M V_i^E \geq V_{2017}^{EP}$ – суммарный объем производства электроэнергии из всех потенциальных источников не меньше, чем объем потребления в 2017 г.;

– $\sum_{i=1}^L V_i^F \geq V_{2017}^{FP}$ – суммарный объем производства топлива из всех

⁵ Под углеродным следом в литературе, как правило, понимаются суммарные выбросы парниковых газов в пересчете на CO₂-эквивалент.

потенциальных источников не меньше, чем объем потребления в 2017 г.

Такая формулировка накладывает лишь требование производства каждого из основных типов энергетических продуктов (электрической энергии, тепловой энергии и моторного топлива) в объемах не меньше реального спроса. Избыточное производство возможно, и в этом случае предполагается, что избыток произведенной продукции реализуется за пределами региона, а финансовые поступления от продажи энергетических продуктов учитываются в ВРП.

Сформулируем теперь блок ограничительных условий по производительности региональной энергетической системы. С учетом возможных направлений развития возобновляемой энергетики в регионе [1, 2]⁴, данные ограничительные условия можно сформулировать следующим образом:

- $S^{PV} \leq S^{sity}$ – площадь для установки солнечных батарей не более площади застройки (предполагается, что использование сельскохозяйственных и лесных угодий, а также земель особо охраняемых природных территорий для постройки солнечных электростанций недопустимо);
- $S^{wind} \leq S^{class}$ – площадь для установки ветровых генераторов не более площади территорий с подходящим классом ветров;
- $V_{garb}^{el} \leq k_{garb}^{el} V_{garb}$ – объем производства электроэнергии на мусоросжигательных заводах не более, чем произведение коэффициента производительности завода на объем образования твердых бытовых отходов (ТБО) в крае;
- $V_{LW}^{el} \leq k_{LW}^{el} V_{LW}$ – объем производства электроэнергии на биогазовых установках не более, чем произведение коэффициента производительности установки на объем образования отходов животноводства в крае.

⁴ Федорова С.Н. Биогазовые электростанции как фактор обеспечения экологической устойчивости экономики региона // Стратегия устойчивого развития регионов России. 2013. № 17. С. 146–151.

Для того чтобы найти решение сформулированной оптимизационной задачи по объемам производства различных видов энергопродуктов, необходимо определить ожидаемую себестоимость новых видов энергопродуктов, производство которых может быть освоено на территории региона, а также их углеродный след.

Мета-анализ литературных и статистических данных для определения коэффициентов себестоимости и углеродного следа (расчетных параметров модели)

Так как Краснодарский край ощущает наибольший дефицит именно электроэнергии, а не моторного топлива (которого производится гораздо больше, чем потребляется) или тепловой энергии, то для апробации предложенного в предыдущем параграфе подхода авторы приняли решение ограничиться моделированием оптимального варианта восполнения недостатка в производстве электроэнергии. В упрощенной постановке задачи (1) и (2) примут вид:

$$\sum_{i=1}^M \beta_i V_i^E \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^M (ce_i^{product} + ce_i^{cons}) V_i^E \rightarrow \min. \quad (4)$$

Оценка себестоимости производства электроэнергии из возобновляемых источников (ВИЭ) проводилась нами исходя из данных по потенциальной производительности (*product*) генерирующего источника (в частности, коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) для фотоэлектрических панелей и ветровых турбин), капитальных (*CapCost*) и эксплуатационных (*ExpCost*) затрат и затрат на транспортировку электроэнергии по сети (*trans*) по формуле:

$$COST = \frac{CapCost + ExpCost \cdot year}{product \cdot year} + trans, \quad (5)$$

где *year* – минимальный срок эксплуатации генерирующего оборудования.

Дисконтирование при расчетах не использовалось. Данные по капитальным затратам и эксплуатационным показателям солнечных и ветровых проектов оценивались на основе официальной информации АО «Администратор торговой системы оптового рынка электроэнергии» о результатах конкурсного отбора проектов ВИЭ, поддерживаемых в рамках постановления Правительства РФ от 28.05.2013⁵. Данные по капитальным и эксплуатационным затратам проектов по биогазовой генерации и генерации за счет переработки твердых бытовых отходов (ТБО) получены из литературных источников.

Данные о негативных экологических эффектах производства энергии оценивались в соответствии с методологией анализа жизненного цикла продукции (Life Cycle Analysis), предполагающей идентификацию, измерение и агрегацию всех негативных воздействий процессов производства (включая все переделы), транспортировки, эксплуатации и утилизации продукции, начиная, как правило, от этапов добычи исходного сырья [3]^{6, 7}.

В настоящей работе методика анализа и оценки жизненного цикла применена в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 14040–14042⁸. Информационной базой исследования

послужили данные, представленные в агрегаторе EcoInvent (некоммерческая ассоциация исследовательских организаций Швейцарии)⁹. В настоящее время EcoInvent является ведущей в мире базой по оценке жизненного цикла (ОЖЦ) в соответствии со стандартами ISO 14040-14043 и содержит наборы данных по жизненному циклу более чем 12 800 продуктов и услуг.

В расширенном виде данные о негативных экологических эффектах жизненного цикла продукции представлены в агрегаторе EcoInvent по семи категориям воздействия на окружающую среду: окисление, изменение климата, пресноводная и морская экотоксичность, токсичность для человека, ионизирующее излучение, землепользование (вывод из оборота продуктивных земель, сокращение площади лесов, потеря биоразнообразия), стратосферное истончение озонового слоя. Подробнее о содержании каждой категории воздействия на окружающую среду сказано в работах [4, 5]. В упрощенном варианте негативное воздействие на окружающую среду может оцениваться только по категории «изменение климата» [6, 7], так как именно климатические воздействия различных технологий в настоящее время подпадают под регулирование многочисленных международных стандартов.

Результаты проведенного мета-анализа данных литературных и статистических источников по технико-экономическим и экологическим параметрам современных ВИЭ приведены в *табл. 1*. Затраты на транспортировку электроэнергии в данном случае не учитываются, так как использование биогазовых установок, как правило, целесообразно в рамках развертывания распределенной генерации, ориентированной

⁵ Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» (с изменениями и дополнениями). URL: <http://base.garant.ru/70388616/>

⁶ ГОСТ Р ИСО 14040-2010 «Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200077762>

⁷ Acero A.P., Rodríguez C., Ciroth A. LCIA Methods. Impact Assessment Methods in Life Cycle Assessment and their Impact categories. Berlin, Green Delta, 2016. URL: <http://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf>

⁸ Соответствуют российским стандартам ГОСТ Р ИСО 14040–2010 «Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура», ГОСТ Р ИСО 14041–2000 «Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Определение цели, области исследования и инвентаризационный анализ», ГОСТ Р ИСО 14042–2001 «Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Оценка воздействия жизненного цикла».

⁹ В настоящий момент в Ассоциацию EcoInvent входят Швейцарская Высшая техническая школа Цюриха, Федеральная политехническая школа Лозанны, Институт Пауля Шеррера, Швейцарская Федеральная лаборатория материаловедения и технологий, Швейцарский федеральный исследовательский центр в области сельскохозяйственных наук Agroscope. URL: <http://www.ecoinvent.org>

на использование генерируемой энергии вблизи от источника генерации [8, 9]^{10, 11, 12}.

Учитывая полученные оценки, можно сформулировать ограничительные условия для оптимизационных задач (3) и (4) непосредственно по объему генерации каждого из доступных видов ВИЭ, что существенно упрощает вид ограничительных условий:

$$V_{grab}^{el} \leq 1\,520\,000,$$

$$V^{PV} \leq 5\,800\,000,$$

$$V^{wind} \leq 1\,060\,000\,000,$$

$$V_{LW}^{el} \leq 218\,000\,000.$$

С учетом сформулированных ограничений, задачи (3) и (4) представляют собой классические задачи линейного программирования, в которых искомыми переменными являются объемы генерации электроэнергии. Для решения сформулированных задач может быть использован хорошо известный в литературе симплекс-метод [10]¹³, программная реализация которого является опцией табличного процессора Excel (опция «Поиск решения»).

Результаты решения оптимизационной задачи

Предположим, что стратегической целью развития энергетической системы региона является постепенное наращивание собственной электрогенерации за счет максимального вовлечения в энергосистему доступных источников возобновляемой энергии. Найдем оптимальную долю каждого

¹⁰ Ланцев А.С., Промыслов В.В. Опыт работы мусоросжигательного завода № 2 г. Москвы // Новости теплоснабжения. 2010. № 11. URL: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2810

¹¹ Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. IRENA Working Paper, 2012, vol. 1, iss. 5-5, 64 p. URL: http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis_wind_power.pdf

¹² Ратнер М.Д. Оценка экономического потенциала и социальных эффектов развития биоэнергетики в Краснодарском крае. Материалы международной научно-практической конференции «Управление инновациями – 2018». М.: ИПУ РАН, 2018.

¹³ Хачатрян С.Р., Пинегина М.В., Буянов В.П. Методы и модели решения экономических задач. М.: Экзамен, 2005. 383 с.

из доступных ВИЭ в случае: если оптимизация производится только по стоимостным параметрам, задача (1); если оптимизация производится только по экологическим параметрам, задача (2); в случае одновременного комплексного решения оптимизационных задач (1) и (2). В предположении, что на первом этапе развития энергосистемы ставится цель увеличить генерацию на 3 млрд кВт·ч/год (что соответствует повышению уровня энергообеспеченности на 10%), результаты решения задач (3), (4) и комплексной задачи приведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов показывает, что при оптимизации развития региональной энергетической системы Краснодарского края только по экономическим параметрам (себестоимости производимой электроэнергии) целесообразно вовлекать в разработку, в первую очередь, в полной мере биоотходы и твердые бытовые отходы как источники энергии, а также полностью использовать потенциал ветровой энергетики.

Значения оптимальных объемов использования данных видов ресурсов равны максимальным. Солнечная генерация вовлекается в разработку по остаточному принципу, чтобы восполнить разницу между уже используемым потенциалом ВИЭ и требуемым объемом генерации.

При оптимизации энергобаланса по экологическим критериям (объемам выбросов парниковых газов по всему жизненному циклу) складывается иная картина: вовлечение биогазовой генерации в энергобаланс становится нецелесообразным, поэтому после полного использования потенциала переработки ТБО и ветровой энергетики разница между использованным потенциалом ВИЭ и требуемым объемом генерации может быть восполнена за счет развития фотовольтаики.

При одновременной оптимизации траектории развития региональной энергосистемы по экономическим и экологическим параметрам объемы вовлечения в энергобаланс всех видов ВИЭ совпадают с объемами, которые

получены при решении задачи оптимизации только по экономическим критериям.

Полученные результаты согласуются с выводами других авторов, исследовавших экономические [11–13] и экологические характеристики различных ВИЭ [14–16], что позволяет сделать вывод о корректности предложенного подхода к выбору стратегии и развития региональной энергетической системы Краснодарского края. Заметим, что основным достоинством предложенного подхода является его масштабируемость, то есть возможность учета большего количества альтернатив развития региональной энергетической системы, в том числе включение в качестве альтернатив развития энергетической системы малой гидроэнергетики, геотермальной энергетики и других видов ВИЭ, а также традиционной электрогенерации с использованием природного газа в качестве топлива и инновационных технологий газовой электрогенерации с использованием комбинированного цикла (Combined Cycle Technology).

Учет в оптимизационных моделях (1) и (2) не только сектора электроэнергетики, но и сектора моторного топлива и сектора тепловой энергетики при сохранении общей структуры модели позволяет преобразовать ее в многосекторную и отследить возможное влияние секторов региональной энергетической системы друг на друга. Развитие предложенного подхода в данном направлении является приоритетом дальнейших исследований авторов.

В то же время следует отметить, что даже в упрощенной постановке оптимизационной задачи предложенный подход к выбору оптимального направления развития региональной энергетической системы позволяет прийти к важному практическому выводу, что отходы жилищно-бытового сектора (посредством строительства и ввода в эксплуатацию современных мусоросжигательных заводов) и сектора животноводства (посредством использования биогазовых установок) имеют приоритет в плане вовлечения в энергобаланс Краснодарского края.

Таблица 1

Данные по технико-экономическим и экологическим параметрам современных ВИЭ

Table 1

Data on technical-and-economic and ecological parameters of modern renewable energy sources (RES)

Параметр	Оценка	Примечания
Производительность мусоросжигательного завода	При мощности 150 тыс. ТБО в год полезный отпуск электроэнергии (без учета потребления на собственные нужды) составляет 19,2 мВт·ч.	Исследования А.С. Ланцева, В.В.Промыслова
Углеродный след (выбросы CO ₂) при производстве электроэнергии из ТБО	0,0056248 кг CO ₂ -эквивалента на 1 кВт·ч произведенной энергии	Международная база данных EcoInvent
Себестоимость производства электроэнергии из ТБО	0,1 евро (в ценах 2005 г.), или 4 руб./ кВт·ч	Международная база данных EcoInvent
Потенциал генерации электроэнергии из ТБО	Из расчета доступных объемов переработки 9 млн т ТБО ежегодно оценка оставляет 1,152 млн кВт·ч/год	Расчеты авторов
Производительность солнечных электростанций	Возможность размещения солнечных батарей мощностью 40 МВт на площади 100 га, средний КИУМ 17%	По данным Орской солнечной электростанции
Ожидаемая себестоимость солнечной энергии	Из расчета капитальных затрат 59 000–122 000 руб./кВт, стоимости эксплуатации 10% от капитальных затрат, минимального срока эксплуатации (без деградации) 15 лет, стоимости транспортировки энергии 30% от стоимости генерации оценка составляет 5,96 руб./ кВт·ч	По данным отбора конкурсных проектов ВИЭ 2017–2018 гг.

Углеродный след (выбросы CO ₂) при производстве и эксплуатации фотоэлектрических панелей	0,07 кг CO ₂ -эквивалента на 1 кВт·ч произведенной энергии	Международная база данных EcoInvent
Потенциал генерации электроэнергии за счет использования фотовольтаики	Из расчета использования 5% от общей площади застройки в регионе (200 тыс. га)	Расчеты авторов
Производительность ветровых электростанций	Допустимая мощность ветровых электростанций в районах Бугазской косы, Таманского полуострова, косы Чушка, Темрюка, Анапы, Приморско-Ахтарска, Ейска и побережья на участке Новороссийск-Геленджик оценивается в 800–1150 МВт. Предполагается использование только 50% потенциала. Средний КИУМ 25–30%	Оценка мощности по данным НИИ «Ленгидропроект» [12]. Оценка КИУМ по данным IRENA
Ожидаемая себестоимость ветровой энергии	Из расчета капитальных затрат 93 000 руб./кВт, стоимости эксплуатации 20% от капитальных затрат, срока эксплуатации 15%, стоимости транспортировки энергии 30% от стоимости генерации оценка составляет 4,54 руб/кВт·ч	По данным отбора конкурсных проектов ВИЭ 2017–2018 гг.
Углеродный след (выбросы CO ₂) при производстве и эксплуатации фотоэлектрических панелей	0,016 кг CO ₂ -эквивалента на 1 кВт·ч произведенной энергии	По данным EcoInvent
Производительность биогазовых установок	Потенциальный объем получаемого биогаза на установках, обеспеченных сырьем (отходами животноводства), составляет 1 010 м ³ в год, что соответствует выработке электроэнергии 100 млн кВт·ч и тепловой энергии (дополнительно) 118 млн кВт·ч.	Исследования М.Д. Ратнер
Ожидаемая себестоимость производства электроэнергии из биогаза	Из расчета капитальных затрат 32 млн руб. на одну установку мощностью переработки 44,5 т. отходов в сутки, эксплуатационных затрат 20% от капитальных и стоимости утилизации отходов 5 тыс. руб./т. оценка составляет 1 руб./кВт·ч	Исследования М.Д. Ратнер
Углеродный след (выбросы CO ₂) при производстве и эксплуатации биогазовых установок	0,298 кг CO ₂ -эквивалента на 1 кВт·ч произведенной энергии	Международная база данных EcoInvent

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 2

Результаты решения оптимизационных задач

Table 2

The results of optimization problems solving

Вид ВИЭ	Оптимальный объем по экономическим критериям (себестоимости)	Оптимальный объем по экологическим критериям (выбросам)	Оптимальный объем по комплексному эколого-экономическому критерию
Генерация из ТБО	1 152 000	1 152 000	1 152 000
Солнечная генерация	1 720 848 000	1 938 848 000	1 720 848 000
Ветровая генерация	1 060 000 000	1 060 000 000	1 060 000 000
Биогазовая генерация	218 000 000	0	218 000 000

Источник: авторская разработка

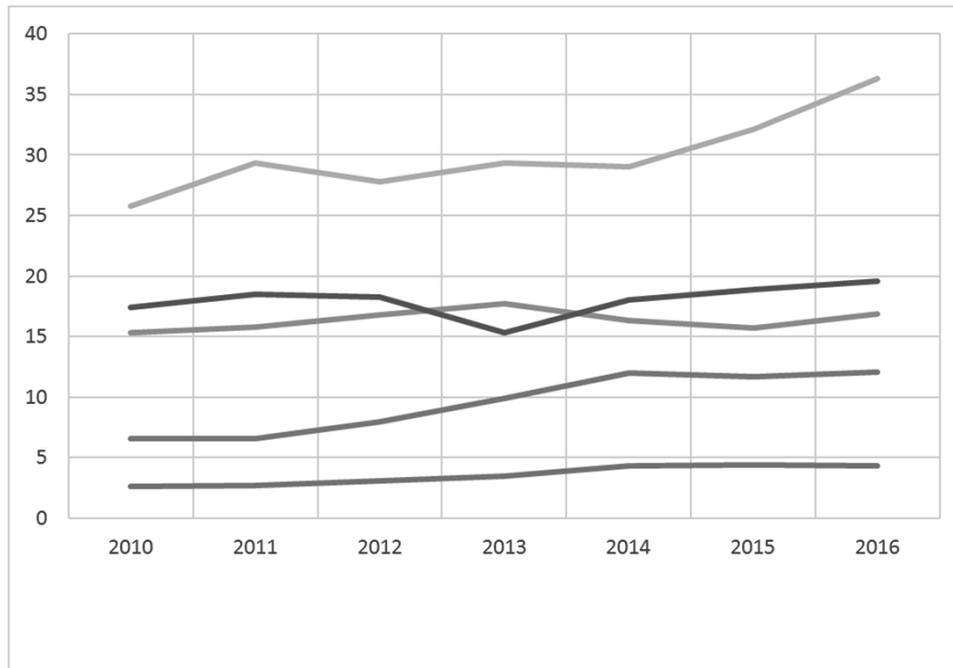
Source: Authoring

Рисунок 1

Производство электроэнергии в промышленно развитых регионах юга России (2010–2016 гг.), млрд кВт·ч. в год

Figure 1

Electrical energy production in the industrial regions of South of Russia (2010–2016), billion kWh per annum



Примечание. Значения графиков (сверху вниз по оси ординат): Ростовская область, Ставропольский край, Волгоградская область, Краснодарский край, Астраханская область.

Источник: авторская разработка

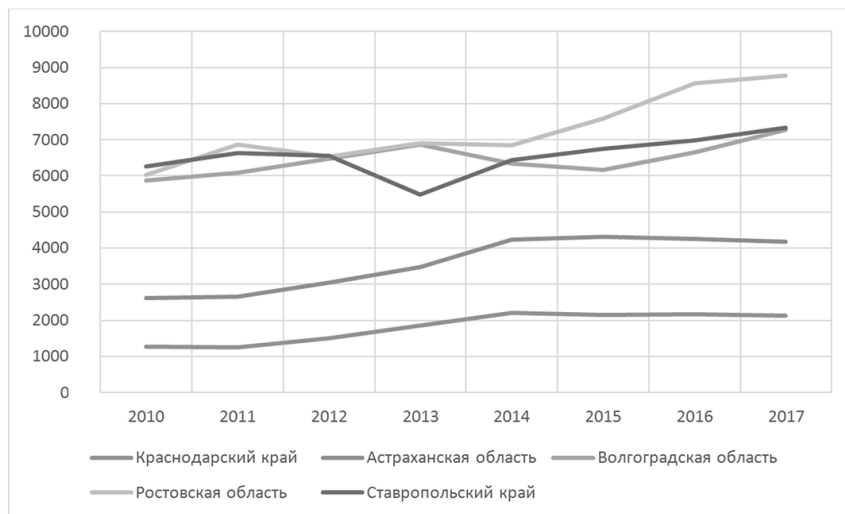
Source: Authoring

Рисунок 2

Производство электроэнергии на душу населения в промышленно развитых регионах юга России (2010–2017 гг.), кВт·ч./чел

Figure 2

Per capita electrical energy production in the industrial regions of South of Russia (2010–2017), kWh per head



Примечание. Значения графиков (сверху вниз по оси ординат, данные за 2015–2016 гг.): Ростовская область, Ставропольский край, Волгоградская область, Астраханская область, Краснодарский край.

Источник: авторская разработка

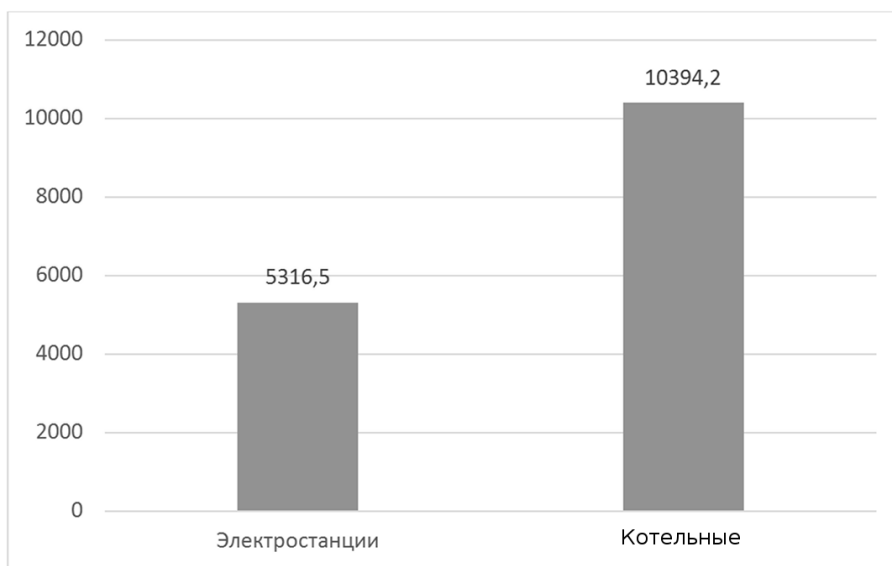
Source: Authoring

Рисунок 3

Производство тепловой энергии в Краснодарском крае в 2017 г., тыс. Гкал

Figure 3

Thermal energy production in the Krasnodar Krai in 2017, thousand Gcal



Источник: авторская разработка на основе данных Министерства энергетики Краснодарского края

Source: Authoring, based on the Krasnodar Krai Department of Energy data

Список литературы

1. *Зубко Д.В.* Характеристика электроэнергетической отрасли Краснодарского края // Бюллетень науки и практики. 2017. № 12. С. 300–306.
URL: <http://doi.org/10.5281/zenodo.1115911>
2. *Дизендорф А.В., Усков А.Е.* Перспективы возобновляемой энергетики // Научный журнал КубГАУ. 2016. № 124. С. 1403–1416. URL: <http://doi.org/10.21515/1990-4665-124-092>
3. *Amponsah N.Y., Troldborg M., Kington B. et al.* Greenhouse Gas Emissions from Renewable Energy Sources: A Review of Lifecycle Considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 461–475. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.087>
4. *Ратнер С.В., Загорецкая К.А.* Оценка экологической эффективности конкурирующих технологий фотовольтаики // Инновации. 2017. № 9. С. 77–84.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/otsenka-ekologicheskoy-effektivnosti-konkuriruyuschih-tehnologiy-fotovoltaiki>
5. *Ратнер С.В., Иосифов В.В.* К вопросу о разработке стратегии развития солнечной энергетики в России с учетом экологических эффектов // Экономический анализ: теория и практика. 2017. Т. 16. Вып. 8. С. 1522–1540. URL: <https://doi.org/10.24891/ea.16.8.1522>
6. *Staples M.D., Malina R., Suresh P. et al.* Aviation CO₂ Emissions Reductions from the Use of Alternative Jet Fuels. *Energy Policy*, 2018, vol. 114, pp. 342–354.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.007>
7. *Palanov N.* Life-Cycle Assessment of Photovoltaic Systems. Analysis of Environmental Impact from the Production of PV System Including Solar Panels Produced by Gaia Solar. Lund, Lund University, 2014. URL: http://www.byfy.lth.se/fileadmin/byfy/files/TVBH-5000pdf/TVBH-5074NP_web.pdf
8. *Васильев Ю.С., Безруких П.П., Елистратов В.В., Сидоренко Г.И.* Оценки ресурсов возобновляемых источников энергии в России. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2008. 251 с.
9. *Кутовой Г.П.* Распределенная генерация в структурах территориальных электросетевых комплексов – актуальный фактор повышения надежности систем электроснабжения потребителей // Энергетическая политика. 2015. № 2. С. 21–30.
10. *Хемди А. Таха.* Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2005. 912 с.
11. *Reichelstein S., Yorston M.* The Prospects for Cost Competitive Solar PV Power. *Energy Policy*, 2013, vol. 55, pp. 117–127. URL: <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.11.003>
12. *Comello S., Reichelstein S., Sahoo A.* The Road Ahead for Solar PV Power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 92, pp. 744–756.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.098>
13. *Dubey S., Jadhav N.Y., Zakirova B.* Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon Based Photovoltaic (PV) Technologies. *Energy Procedia*, 2013, vol. 33, pp. 322–334.
URL: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.073>
14. *Kim H.C., Fthenakis V., Choi J.-K., Turney D.E.* Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Thin-film Photovoltaic Electricity Generation. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, vol. 16, no. S1, pp. S110–S121. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00423.x>

15. Hsu D., O'Donoghue P., Fthenakis V. et al. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation. Systematic Review and Harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, vol. 16, no. S1, pp. S122–S135.
URL: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00439.x>
16. Turconi R., Boldrin A., Astrup T. Life Cycle Assessment (LCA) of Electricity Generation Technologies: Overview, Comparability and Limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 28, pp. 555–565. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>

Информация о конфликте интересов

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

OPTIMIZATION OF THE REGIONAL ENERGY SYSTEM WITH HIGH POTENTIAL OF USE OF BIO-WASTE AND BIORESOURCES AS ENERGY SOURCES WITH RESPECT TO ECOLOGICAL AND ECONOMIC PARAMETERS: THE KRASNODAR KRAI CASE

Svetlana V. RATNER ^{a*}, Valerii V. IOSIFOV ^b, Mariya D. RATNER ^c

^a V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
lanaratner@ipu.ru
ORCID: not available

^b Kuban State Technological University (KUBSTU), Krasnodar, Russian Federation
iosifov_v@mail.ru
ORCID: not available

^c Kuban State University (KubSU), Krasnodar, Russian Federation
keep3up3@gmail.com
ORCID: not available

* Corresponding author

Article history:

Received 7 November 2018
Received in revised form
21 November 2018
Accepted 28 November 2018
Available online
14 December 2018

JEL classification: O44, Q01

Keywords: regional energy system, energy balance, environmental footprint, product life cycle analysis, optimization, modeling

Abstract

Subject This article discusses the prospects for the development of the regional energy system through proliferation of the traditional energy technologies use. It also examines the potential for the development of various types of renewable energy sources that can offset the growing energy deficit.

Objectives The article aims to develop an economic and mathematical model that allows optimizing the development of the regional energy system with respect to ecological and economic criteria.

Methods For the study, we used the life-cycle assessment (LCA) methodology in accordance with ISO 14000, cost-effectiveness analysis (CEA), and the linear programming (LP) method.

Results The article says that when optimizing the development of the regional energy system of the Krasnodar Krai in terms of economic parameters, it is preferable to utilize bio-waste and solid household waste (MSW) as sources of energy, fully utilizing the potential of wind power. Photovoltaics (PV) generation can be involved by residual principle. When optimizing the energy mix with respect to environmental criteria, the involvement of biogas generation is impractical.

Conclusions After full use of the potential of processing of MSW and wind energy, the difference between the used potential of renewable sources of energy and the required volume of generation can be compensated by the development of photovoltaics.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2018

Please cite this article as: Ratner S.V., Iosifov V.V., Ratner M.D. Optimization of the Regional Energy System with High Potential of Use of Bio-Waste and Bioresources as Energy Sources with Respect to Ecological and Economic Parameters: The Krasnodar Krai Case. *Regional Economics: Theory and Practice*, 2018, vol. 16, iss. 12, pp. 2383–2398. <https://doi.org/10.24891/re.16.12.2383>

Acknowledgments

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Krasnodar Krai Administration, project № 18-410-230011_a(p), *Development of a Dynamic Model of Optimization of the Regional Energy System with High Potential of Use of Bio-Waste and Bioresources as Energy Sources with Respect to Ecological and Economic Parameters: The Krasnodar Krai Case Study*.

References

1. Zubko D.V. [Characteristic of electrical power branch of Krasnodar Region]. *Byulleten' nauki i praktiki = Bulletin of Science and Practice*, 2017, no. 12, pp. 300–306. (In Russ.)
URL: <http://doi.org/10.5281/zenodo.1115911>
2. Dizendorf A.V., Uskov A.E. [Prospects of renewed power]. *Nauchnyi zhurnal KubGAU*, 2016, no. 124, pp. 1403–1416. (In Russ.) URL: <http://doi.org/10.21515/1990-4665-124-092>
3. Amponsah N.Y., Troldborg M., Kington B. et al. Greenhouse Gas Emissions from Renewable Energy Sources: A Review of Lifecycle Considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 461–475. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.087>
4. Ratner S.V., Zakoretskaya K.A. [Assessment of ecological effectiveness of competing photovoltaic technologies]. *Innovatsii = Innovations*, 2017, no. 9, pp. 77–84.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/otsenka-ekologicheskoy-effektivnosti-konkuriruyuschih-tehnologiy-fotovoltaiki> (In Russ.)
5. Ratner S.V., Iosifov V.V. [Strategizing for solar energy development in Russia subject to environmental impact]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*, 2017, vol. 16, iss. 8, pp. 1522–1540. (In Russ.)
URL: <https://doi.org/10.24891/ea.16.8.1522>
6. Staples M.D., Malina R., Suresh P. et al. Aviation CO₂ Emissions Reductions from the Use of Alternative Jet Fuels. *Energy Policy*, 2018, vol. 114, pp. 342–354.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.007>
7. Palanov N. Life-Cycle Assessment of Photovoltaic Systems. Analysis of Environmental Impact from the Production of PV System Including Solar Panels Produced by Gaia Solar. Lund, Lund University, 2014. URL: http://www.byfy.lth.se/fileadmin/byfy/files/TVBH-5000pdf/TVBH-5074NP_web.pdf
8. Vasil'ev Yu.S., Bezrukikh P.P., Elistratov V.V., Sidorenko G.I. *Otsenki resursov vozobnovlyemykh istochnikov energii v Rossii* [Estimates of renewable energy resources in Russia]. St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2008, 251 p.
9. Kutovoi G.P. [Distributed generation in structures of territorial power grid – actual factor of increasing the reliability of power procurement systems]. *Energeticheskaya politika = The Energy Policy*, 2015, no. 2, pp. 21–30. (In Russ.)
10. Hamdy A. Taha. *Vvedenie v issledovanie operatsii* [Operations Research: An Introduction]. Moscow, Vil'yams Publ., 2005, 912 p.
11. Reichelstein S., Yorston M. The Prospects for Cost Competitive Solar PV Power. *Energy Policy*, 2013, vol. 55, pp. 117–127. URL: <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.11.003>
12. Comello S., Reichelstein S., Sahoo A. The Road Ahead for Solar PV Power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 92, pp. 744–756.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.098>
13. Dubey S., Jadhav N.Y., Zakirova B. Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon Based Photovoltaic (PV) Technologies. *Energy Procedia*, 2013, vol. 33, pp. 322–334.
URL: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.073>

14. Kim H.C., Fthenakis V., Choi J.-K., Turney D.E. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Thin-film Photovoltaic Electricity Generation. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, vol. 16, no. S1, pp. S110–S121. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00423.x>
15. Hsu D., O'Donoghue P., Fthenakis V. et al. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation. Systematic Review and Harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, vol. 16, no. S1, pp. S122–S135. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00439.x>
16. Turconi R., Boldrin A., Astrup T. Life Cycle Assessment (LCA) of Electricity Generation Technologies: Overview, Comparability and Limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 28, pp. 555–565. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>

Conflict-of-interest notification

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.