



А. Л. Казаков, А. А. Лемперт, А. Б. Столбов, Б. Г. Санеев,  
С. П. Попов

## Принципы создания технологии моделирования и прогнозирования развития региональных топливно-энергетических комплексов России и Монголии с учетом энергетического сотрудничества двух стран

**Аннотация.** Статья посвящена разработке вычислительной технологии для сценарного моделирования и прогнозирования взаимосвязанного развития национальных топливно-энергетических комплексов России и Монголии с учетом межстрановой торговли топливно-энергетическими ресурсами. Целью исследования является создание методологической базы для определения наиболее перспективных вариантов двухстороннего взаимодействия, которая позволит давать обоснованные оценки эффективности проектам сотрудничества России и Монголии в области энергетики. Научной основой для создаваемой технологии послужили принципы агентного имитационного моделирования, в соответствии с которыми изучаемые объекты рассматриваются как элементы многоагентной системы.

Для создания агентной имитационной модели (АИМ) топливно-энергетического комплекса России и Монголии выбрано инструментальное средство разработки агентных имитационных моделей Adskit. Проведено обоснование выбора программных средств, разработаны методические принципы и архитектура АИМ. Построена математическая модель для задачи прокладки маршрутов протяженных энергетических объектов, имеющая вид специальной задачи вариационного исчисления, для её решения предложен авторский алгоритм на основе принципов геометрической оптики.

**Ключевые слова и фразы:** вычислительная технология, агентное имитационное моделирование, математическое моделирование, вычислительный алгоритм, энергетическое сотрудничество, сценарии развития, топливно-энергетический комплекс.

---


Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-510-94006 МОКНМ<sub>а</sub>.

© А. Л. Казаков<sup>(1)</sup>, А. А. Лемперт<sup>(2)</sup>, А. Б. Столбов<sup>(3)</sup>, Б. Г. Санеев<sup>(4)</sup>, С. П. Попов<sup>(5)</sup> 2019

© Институт динамики систем и теории управления СО РАН<sup>(1, 2, 3)</sup> 2019

© Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН<sup>(4, 5)</sup> 2019

© Программные системы: теория и приложения (дизайн), 2019

 10.25209/2079-3316-2019-10-4-3-24



## Введение

В последние годы стремительно возрастает роль Северо-Восточной Азии (СВА) в мировой экономике, что сопровождается увеличением потребности стран региона в топливно-энергетических ресурсах. В подобной ситуации России чрезвычайно важно предпринимать максимальные усилия для увеличения присутствия на динамично развивающихся энергетических рынках стран СВА. В таком контексте Восточная Сибирь и Дальний Восток приобретают стратегическое значение для выхода на азиатские рынки. Увеличивается также значение Монголии как контактной зоны для региона СВА. Таким образом, российско-монгольское сотрудничество в энергетической сфере выходит за пределы сугубо двусторонних отношений и приобретает макрорегиональный характер [?vor2011].

В этом контексте тематика настоящего исследования, посвященного разработке методических принципов создания вычислительной технологии (ВТ) для сценарного моделирования и прогнозирования взаимосвязанного развития национальных топливно-энергетических комплексов России и Монголии, приобретает особую актуальность. Основой для ВТ служат принципы агентного имитационного и математического моделирования. Ее реализация в виде программной системы позволит давать научно обоснованные оценки эффективности проектам сотрудничества России и Монголии в области энергетики.

## 1. Постановка задачи

В послевоенные годы между СССР и МНР было развито тесное взаимодействие в области энергетики, а в постсоветский период интенсивность контактов существенно снизилась. Как в реализуемых, так и в перспективных проектах по осуществлению поставок российских энергоресурсов в Китай, маршруты транспортировки проходят, минуя Монголию, что, на наш взгляд, неоправданно, поскольку Монголия может стать удобным транспортным коридором для поставки из России в КНР и другие страны СВА электроэнергии, нефтепродуктов и природного газа [?vor2013]. Последнее обстоятельство также будет способствовать газификации территории Восточной Сибири и Монголии, т.е. для российских регионов будет иметь социальный эффект, способствовать обеспечению связности территории РФ, а также усилит авторитет и влияние России в СВА [?san2015, ?san2013].

Таким образом, совместное развитие энергетической инфраструктуры восточных регионов России и Монголии является на современном

этапе настоящей необходимостью, по крайней мере, с точки зрения геополитики. Однако, помимо политических факторов, существует также экономическая целесообразность, и именно она является камнем преткновения для реализации соответствующих планов. Для того, чтобы научно обосновать проекты межстранового энергетического сотрудничества, в современных условиях невозможно обойтись без использования методов математического и компьютерного моделирования.

Как в России, так и в Монголии разработаны системы оптимизационных экономико-математических моделей прогнозирования и исследования приоритетных направлений развития национальных ТЭК с учетом внешних (межстрановых) топливно-энергетических связей. Модели были реализованы в виде программ для ЭВМ и получили широкое применение (см., например [?mak1973, ?san2003, ?bat97]), однако указанные разработки относятся к советскому периоду истории и нуждаются в обновлении. Выработка конкретных рекомендаций, направленных на решение данной проблемы, является одной из целей, которую авторы статьи совместно с монгольскими коллегами ставят перед собой.

При этом, помимо оптимизационных моделей, которые, разумеется, сохраняют свою актуальность, на наш взгляд, в современных (рыночных) условиях необходимо также использовать методы имитационного моделирования. К их числу относится агентное моделирование, в соответствии с принципами которого изучаемые объекты рассматриваются как элементы децентрализованной системы, их функционирование подчиняется некоторым определенным правилам. Агентные модели способны дополнить традиционные экономико-математические методы, которые позволяют найти равновесные состояния системы (стационарные оптимумы). Агентные модели, в свою очередь, имитируют переходные процессы, включая появление неустойчивостей, и позволяют учесть влияние микрофакторов на поведение системы на макроуровне.

В рамках настоящего исследования предложены методические принципы создания агентной имитационной модели (АИМ) топливно-энергетического комплекса России и Монголии и разработана её архитектура. Кроме того, в рамках развития оптимизационных экономико-математических моделей построена математическая модель для задачи прокладки маршрутов протяженных энергетических объектов, имеющая вид специальной задачи вариационного исчисления, для её решения предложен авторский алгоритм на основе принципов геометрической оптики.

## 2. О технологии агентного имитационного моделирования

Агентная имитационная модель (АИМ) – это вычислительная модель, рассматривающая изучаемые объекты как элементы много-агентной системы. Многоагентная (мультиагентная) система (МАС), в свою очередь, представляет собой систему активных и автономных элементов (агентов), взаимодействующих друг с другом для выполнения сложных задач. Следовательно, поведение МАС в целом определяется как результат коллективного поведения агентов: принятыми ими решениями и осуществленными действиями.

Гибкость подхода на основе МАС заключается в возможности варьировать внутреннюю структуру агента без значительных изменений протоколов коммуникаций с внешним миром (другими агентами и окружающей средой). В настоящее время разработано большое количество вариантов архитектур агентов, краткий обзор которых можно найти, например, в работе [?nik2018]. Упрощенно абстрактную модель агента можно представить как совокупность элементов следующего типа (рисунок ??): *S* (sense) – сенсорная система, восприятие; *C* (communicate) – блок взаимодействия с другими агентами; *D* (decide) – блок принятия решений; *A* (actuate) – исполнительная система (действие).

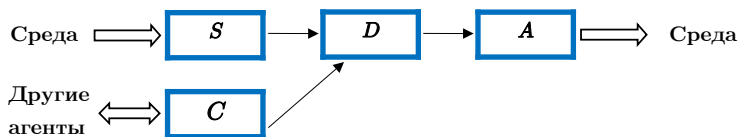


Рисунок 1. Абстрактная модель агента

С точки зрения процесса моделирования использование МАС позволяет разработчикам сосредоточиться на описании индивидуальной логики поведения агентов, а поведение системы в целом оценивается после проведения серии вычислительных экспериментов на основе АИМ. Использование АИМ как исследовательского инструмента наиболее эффективно при решении таких задач, в которых структура изучаемых объектов изначально подобна МАС, т.е. элементы изучаемой системы являются гетерогенно распределенными, обладают проактивным поведением и в процессе функционирования координируют свои действия друг с другом. В связи с этим применение МАС и АИМ наиболее успешно в таких предметных областях как логистика, финансы, энергетика, биология, социальная сфера.

Практика совместного применения АИМ с другими типами моделей (например, дискретно-событийными и дискретно-непрерывными) показывает [?bor2004], что АИМ все чаще выступает в роли интегрирующего звена, так как агенты могут использовать разнообразные методы принятия решений: простые реактивные правила вида «ЕСЛИ ... ТО»; алгоритмы, основанные на динамических математических моделях; сложные когнитивные поведенческие шаблоны (например, модель убеждений, желаний и намерений [?rao95]). Таким образом, использование МАС и АИМ для прогнозирования долгосрочного развития ТЭК России и Монголии позволяет расширить методологический аппарат для разработки научных основ формирования приоритетных направлений сотрудничества в энергетической сфере как за счет новых типов моделей, так и комбинации существующих.

### 3. Об использовании программных средств для создания АИМ

При разработке АИМ ТЭК России и Монголии необходимо учитывать следующие особенности. Во-первых, исследования в этом направлении являются междисциплинарными. Поэтому особое внимание необходимо уделить проблеме выработки единого понятийного аппарата и формированию согласованной концептуальной модели предметной области, элементы которой могут быть использованы в качестве единой спецификации для описания составляющих проектируемой АИМ.

Во-вторых, из-за поискового характера исследования состав, тип и методы принятия решений агентов могут часто видоизменяться, а процесс разработки АИМ неизбежно будет итеративным. Следовательно, необходимо иметь возможности быстрой реконфигурации архитектуры агентов АИМ с целью проверки различных гипотез относительно вариантов их поведения и проведения массовых тестовых вычислительных экспериментов для калибровки параметров АИМ.

В-третьих, для упрощения процедуры изменений, возникающих в процессе разработки АИМ, целесообразным является явное разделение агентной и предметной составляющей АИМ. В этом случае, эксперты-предметники смогут относительно независимо проектировать базы знаний предметной области, а затем при участии специалистов в имитационном моделировании формировать различные варианты агентной модели. Такой подход к созданию АИМ позволяет сократить время на разработку и снизить порог вхождения в область агентного моделирования для экспертов.

В-четвертых, следует учитывать, что, эксперты-предметники не являются специалистами в области программирования и им необходимо предоставить визуальные, интуитивно понятные и простые в использовании инструменты проектирования концептуальных моделей и баз знаний, а также средства для обзора и редактирования АИМ и управления вычислительным экспериментом.

Описанные особенности процесса разработки АИМ ТЭК России и Монголии накладывают определенные требования на инструментальные средства поддержки моделирования: формулировка задач должна осуществляться в содержательной терминологии, что в свою очередь определяет необходимость явного применения концептуальной модели исследуемой области в процессе проектирования АИМ; для описания закономерностей исследуемой области целесообразно использовать интуитивно понятные инструменты (например, продукционные правила и визуальное программирование); должны быть возможности быстрого прототипирования прикладной АИМ и последовательного усложнения её поведения.

Указанным требованиям удовлетворяет инструментальное средство разработки агентных имитационных моделей Adskit [[?nik2018rpc](#), [?nik2018itams](#)], которое содержит расширяемый комплекс компонентов: веб-редактор концептуальных моделей в форме онтологий “понятие-свойство-отношение”; веб-редактор баз знаний продукционного типа; веб-редактор предметно-независимого поведения агентной модели в форме потока работ (workflow); веб-редактор агентной имитационной модели, использующий другие компоненты ИСП АИМ при создании модели; веб-редактор управления вычислительным экспериментом. Последовательный процесс формирования модели с использованием Adskit осуществляется в соответствии со следующим обобщенным алгоритмом.

- (1) Создание концептуальной модели архитектуры АИМ, т.е. определение базовых элементов из которых будут формироваться конкретные предметные модели. Например, специализация блоков абстрактной модели агента (рисунок ??).
- (2) Разработка концептуальной модели предметной области и баз знаний, описывающих поведение объектов с содержательной точки зрения.
- (3) Формирование агентной модели за счет установления соответствия между содержательными понятиями и правилами, полученными на шаге 2, и архитектурными элементами, заданными на шаге 1.

- (4) Определение начальных условий для элементов АИМ и других параметров вычислительного эксперимента.
- (5) Проведение сценарных расчетов на основе полученной модели и в соответствии с заданными условиями эксперимента.

#### 4. О технологии создания АИМ ТЭК России и Монголии

На предметно-независимом (абстрактном) уровне для создания АИМ ТЭК России и Монголии может быть использована следующая архитектура АИМ [?nik2018rpc, ?nik2018itams]:

<АИМ>=<Агент>, <Окружающая среда>, <Действие>, <Событие>,  
<Агент>=<Алгоритм жизненного цикла> {<Роль>} {<Сенсорная функция>},  
<Окружающая среда>=<Алгоритм жизненного цикла> {<Объект>}  
{<Ограничение>}.

Содержательное поведение агента определяется его ролями, с каждой ролью связана база знаний и множество разнотипных свойств и характеристик. Набор ролей конкретного агента может динамически изменяться в процессе моделирования. Окружающая среда содержит множество параметров макроуровня модели (например, географические характеристики пространства, температуру среды и т.п.) и набор реактивных объектов, функционирование которых моделируется специальным образом. С помощью архитектурного элемента <Ограничение> в АИМ задаются ограничения на правила поведения агентов и при необходимости их действия могут блокироваться на макроуровне.

Набор ограничений также может динамически изменяться в процессе моделирования. Под событием в данной архитектуре АИМ понимается сущность, которая создается в конкретный момент и может приводить к изменению состояния элементов модели. События могут различаться по типам и области влияния. Все возможные в АИМ действия можно разделить на три абстрактных типа: отправка сообщений, изменение состояния, порождение события. При этом инициатором действий могут быть только агенты или среда.

<Алгоритм жизненного цикла> – это абстракция, предназначенная для описания последовательности действий, выполняемых соответствующим элементом АИМ в период между своим созданием (активацией) до удаления (деактивацией). Данный оригинальный архитектурный элемента позволяет Adskit формировать типы агентов, отличающиеся предметно-независимыми алгоритмами принятия решений. Например, для агента может быть реализована следующая последовательность:

- (1) Получение данных из различных источников (из сообщений, от сенсоров, на основе событий).
- (2) Формирование множества альтернативных реакций/действий в зависимости от текущего набора ролей агента.
- (3) Выбор реакций/действий на основе соответствующей базы знаний.
- (4) Оценка действий со стороны окружающей среды (проверка ограничений).
- (5) Выполнение/реализация выбранных и одобренных действий.

При проектировании АИМ ТЭК России и Монголии все перечисленные архитектурные элементы в соответствии с Adskit подходом должны быть проинтерпретированы с содержательной точки зрения. На первом этапе разработок предлагается адаптировать существующие агентные модели [?Mor2016] с учетом региональной и проблемной специфики ТЭК. В качестве примера, можно привести модель Electricity Market Multi-Agent System (EMMAS) [?Gna2004], предназначенную для описания электроэнергетического рынка. Структура EMMAS обладает достаточным уровнем абстракции и перспективами дальнейшего развития. В частности, агенты в этой модели могут выполнять следующие роли:

*потребитель электроэнергии* (закупает электроэнергию для собственных нужд);

*производитель электроэнергии* (продает производимую электроэнергию через оптовиков);

*системный оператор* (осуществляет централизованное оперативно-технологическое управление в энергетической системе);

*дистрибьютор* (управляет распределительной сетью, обеспечивая безопасность и надежность системы распределения);

*оптовый продавец* (покупает электроэнергию у производителей для перепродажи розничным торговцам, не владеет средствами генерации, передачи или распределения);

*розничный продавец* (закупает электроэнергию у оптовиков и перепродает её потребителям, не владеет средствами генерации, передачи или распределения);

*регулирующий/контролирующий орган* (выполняет регулирующие функции на рынке электроэнергии с помощью законов или других законных средств, контролирует поведение участников рынка, осуществляет посредничество в конфликтных ситуациях, отвечает за планирование и долгосрочную безопасность электроснабжения).



Существуют и другие архитектуры АИМ в области энергетики, при этом сами АИМ могут решать широкий круг задач на разный временной горизонт: стратегическое планирование [?Alf2011]; моделирование рынка энергетики [?Gna2004]; управление сетями и моделирование работы сети [?Pip2009]; мониторинг и диагностика энергетических систем [?Sal2010]. В дальнейшем за счет возможностей Adskit можно проводить постепенное усложнение алгоритмов поведения элементов АИМ, вводить новые типы агентов, событий и действий (как расширяющие, так и замещающие существующие).

Прогнозирование долгосрочного развития региональных топливно-энергетических комплексов и входящих в них отраслевых систем на основе АИМ ТЭК России и Монголии осуществляется в форме сценарного анализа. При этом экспертами осуществляется информационное сопровождение многовариантных вычислительных экспериментов и последующая оценка полученных результатов. Для создания сценария необходимо: определить какие типы агентов и объектов участвуют в эксперименте, установить их начальное состояние и количественный состав; сформировать параметры среды и исходный набор ограничений на макроуровне АИМ.

Для информационного обеспечения процесса разработки содержательных сценариев могут быть использованы разнообразные источники: результаты научных исследований; программы, стратегии и проекты развития; экспертные оценки. Например, на основе рекомендаций и мероприятий, содержащихся в стратегии долгосрочного развития энергетического сектора Монголии на 2015-2040 годы, могут быть сформированы следующие типы сценариев:

- (1) Создание новых и модернизация существующих генерирующих мощностей: строительство ТЭЦ, ТЭС, ГЭС в разных районах Монголии.
- (2) Строительство и модернизация линий электропередач.
- (3) Формирование единого регулируемого конкурентного рынка энергетического сектора Монголии.
- (4) Использование возобновляемых источников (солнечная энергия, энергия ветра, биомассы и т.п.) для электроснабжения домашних хозяйств, предприятий и отдаленных населённых пунктов.
- (5) Импорт и экспорт электроэнергии.

Особенность использования подхода агентного моделирования заключается в том, что разработанные в процессе создания АИМ ТЭК типы сценариев могут рассматриваться как независимо друг от друга,

так и совместно, определяя комплексные стратегии долгосрочного развития.

Анализ существующих АИМ в области энергетике [Mor2016, Gna2004, Alf2011, Pip2009, Sal2010] и опыта их использования подтверждает перспективность исследований на основе парадигмы МАС. В целом использование МАС и АИМ для прогнозирования и оценки состояния ТЭК России и Монголии позволяет организовать поэтапное исследование энергетической системы с постепенным развитием модели: увеличением типов объектов и агентов; улучшением алгоритмов принятия решений, в том числе на основе математических моделей; формированием комплексных сценариев.

## 5. О модели и алгоритме трассировки

Пусть на полигоне обслуживания  $M$  имеется  $m$  объектов  $A_1, \dots, A_m$ , которые необходимо обеспечить коммуникациями (дороги, трубопроводы, линии электропередач и т.п.), при этом суммарная их стоимость должна быть минимально возможной. Будем предполагать, что точки ветвления (точки Штейнера) отсутствуют, т.е. необходимо построить минимальное остовное дерево. Такая постановка актуальна, в частности, при прокладке линий электропередач, когда организация ветвлений затруднительна.

Отметим, что стоимость определяется не только длиной ребер, но и зависит от коэффициентов удорожания удельных капиталовложений (вплоть до запретительных значений) по отношению к стандартным условиям, а также учитывать необходимость выполнения определенных требований, в частности, включать штраф за прохождение по определенным участкам (заповедники, объекты национальной безопасности, и т.п.). Коэффициентами удорожания удельных капиталовложений линейной части являются следующие показатели: качество грунтов (песчаный, глинистый, скальный; болотистый и т.д.); сейсмичность; протяженность и глубина водных переходов; перепады; наличие застройки и т.п.

Таким образом, вес участка между  $i$ -м и  $k$ -м объектом заранее неизвестен и напрямую зависит от выбранного маршрута. В такой постановке задачу можно разбить на две подзадачи: отыскание наилучших (минимальной стоимости) маршрутов между всеми рассматриваемыми объектами и, собственно, построение минимального остовного дерева.

Для решения первой подзадачи будем использовать подход, предложенный в [14], который подразумевает решение следующей задачи

бесконечномерной оптимизации (вариационного исчисления):

$$(1) \quad F_{i,k} = \min_{\Gamma_{i,k} \in G} \int_{\Gamma_{i,k}} v(x, y) d\Gamma.$$

Здесь  $F_{i,k}$  – стоимость прокладки коммуникаций между  $A_i$  и  $A_k$  по оптимальному маршруту  $\Gamma_{i,k}^* \in G$  ( $i, k = \overline{1, m}; k \neq i$ ), где  $G$  – множество всевозможных кривых, соединяющих заданные точки;  $v(x, y) \geq \gamma > 0$  – кусочно-непрерывная функция, характеризующая в точке  $(x, y)$  цену строительства.

В результате решения первой подзадачи получим связный неориентированный взвешенный граф  $W(U, \Gamma^*)$ , в котором  $U = \cup_{i=1}^m A_i$  – множество вершин, а  $\Gamma^*$  – множество их возможных попарных соединений (ребер), причем для каждого ребра  $(i, k)$  однозначно определен его вес  $w(i, k) = F_{i,k}$ .

Задача состоит в нахождении такого связного ациклического подграфа  $M \subset W$ , содержащего все вершины, что суммарный вес его ребер будет минимален.

$$(2) \quad w(M) = \sum_{(i,k) \in M} F_{i,k} \rightarrow \min.$$

Для решения полученной математической задачи использован разработанный авторами ранее оптико-геометрический подход [Kaz2011, Kaz2013], суть которого заключается в применении аналогии между распространением света в оптически-неоднородной среде и нахождением минимума интегрального функционала (??). Согласно принципу Ферма, свет выбирает траекторию, по которой он движется с наибольшей скоростью, иначе говоря – экстремаль. Это позволяет, выпустив из точки  $A$  световую волну, имеющую локальную скорость движения  $f(x, y) = 1/v(x, y)$ , отслеживая положения её фронта, установить момент, когда первый «фотон» достигнет точки  $B$ , и, двигаясь в попятном времени, построить траекторию его движения. Это и будет искомая кривая, доставляющая оптимум. Отметим, что в данном случае скорость распространения волн обратно пропорциональна стоимости строительства.

Таким образом, ключевым моментом здесь является построение фронта световой волны, который, как известно, описывается уравнением эйконала [Cas2013], представляющим собой нелинейное неоднородное дифференциальное уравнение в частных производных первого порядка

$$\|\nabla u(\mathbf{x})\| = 1/f(\mathbf{x}),$$

где  $\nabla$  – оператор градиента,  $\|\cdot\|$  – евклидова норма.

Линии уровня искомой функции  $u(\mathbf{x}) = \text{const}$  задают положения фронта волны в различные моменты времени.

Для построения фронта световой волны, выпущенной из точечного источника, используется следующий алгоритм.

### Алгоритм «Волна»

**ШАГ №1.** Вводим равномерную сетку шагом  $h$ . Тогда вместо множества  $M$  рассматривается сеточное множество  $M^h \subset M$ . Пусть имеются переменные:  $p(x_p, y_p) \in M^h$  – текущий узел сетки,  $A = \{O\}$  – одномерный массив вспомогательных точек,  $T(x, y) := \infty$  – двумерный массив, содержащий время перемещения световой волны от  $O$  до  $(x, y)$ . Положим  $p := O$ , тогда  $T(x_p, y_p) = 0$ .

**ШАГ №2.** Определим множество  $B = \{B_j \in M^h, j = \overline{1, m}\}$ , которое включает ближайшие узлы к  $p(x_p, y_p)$  по заданным 8, 16 или 32 направлениям (соответственно имеем 8, 24 и 48 узлов). Затем все элементы множества  $B$  добавляются в множество  $A$ , т.е.  $A = A \cup B$ .

**ШАГ №3.** Если  $B \neq \emptyset$ , то определяется время движения световой волны от  $O$  до каждого элемента множества  $B$ :  $T(x_{B_j}, y_{B_j}) = T(x_p, y_p) + t_{pB_j}$ . Здесь  $t_{pB_j}$  – время движения световой волны из  $p$  в  $B_j$ :

$$t_{pB_j} = 2 \frac{\sqrt{(x_p - x_{B_j})^2 + (y_p - y_{B_j})^2}}{f(x_p, y_p) + f(x_{B_j}, y_{B_j})}.$$

**ШАГ №4.** Если найденное  $T(x_{B_j}, y_{B_j})$  меньше предыдущего значения в рассматриваемом узле, то оно сохраняется. Также фиксируется и точка  $p_{B_j} := p$  как точка, из которой пришла волна.

Шаги №3, №4 выполняются независимо для всех элементов множества  $B$ .

**ШАГ №5.** Если  $M^h \setminus A = \emptyset$ , то алгоритм завершается. В противном случае,  $p(x_p, y_p)$  заменяется значением координат элемента множества  $B$  и осуществляется переход к Шагу №2. Данный шаг выполняется для всех элементов множества  $B$ .

Результатом работы данного алгоритма является значение времени достижения световой волны, выпущенной из точки  $O(x_O, y_O) \in M$ , каждого элемента сеточного множества  $M^h \subset M$ . Поскольку на шаге №4 для каждой точки сохраняется точка-источник волны, то двигаясь

в попятном времени, нетрудно восстановить кратчайший маршрут из  $O$  до любой точки  $Q(x_q, y_q) \in M^h$ .

С учетом вышесказанного, для решения задачи (??)-(??) предлагается следующий алгоритм:

**ШАГ №1.** Из заданного множества объектов  $A_k, k = \overline{1, m}$  выбирается один и маркируется (рисунок ??).

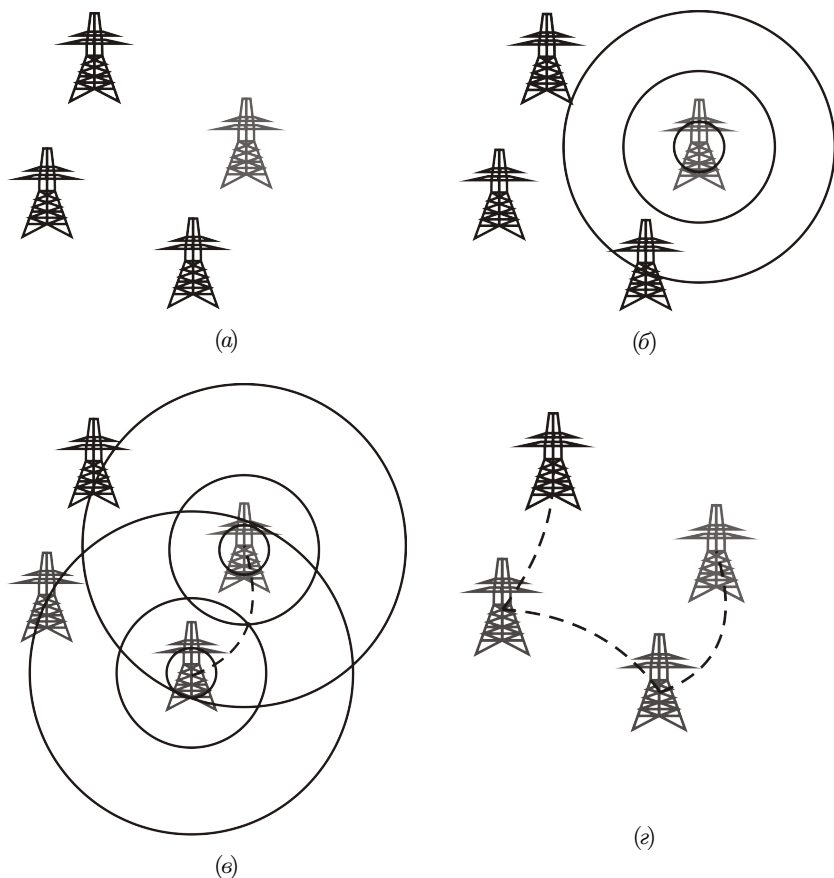


Рисунок 2. Иллюстрация работы алгоритма

**ШАГ №2.** Из маркированного объекта выпускается световая волна с помощью вышеизложенного алгоритма «Волна», и фиксируется момент времени, когда она впервые достигает

любого немаркированного объекта (рисунок ??):

$$t^* = \min_{1 \leq k \leq m} T(x_k, y_k), A^* = \arg \min_{1 \leq k \leq m} T(x_k, y_k).$$

*ШАГ №3.* Достигнутый волной объект  $A^*$  маркируется и соединяется маршрутом с объектом-источником. Если одновременно достигается два или более немаркированных объекта, то маркируется один. Если немаркированный объект одновременно достигается двумя или более волнами, то выбирается любой из соответствующих объектов-источников и строится маршрут.

*ШАГ №4.* Из каждого маркированного объекта выпускается световая волна по алгоритму «Волна» (рисунок ??). В некоторый момент времени  $t$  одна из световых волн достигает ближайший немаркированный объект. Если оставшихся немаркированных объектов больше двух, то выполняется ШАГ №3. В противном случае достигнутый волной объект маркируется и соединяется маршрутом с объектом-источником (рисунок ??).

В результате за конечное число шагов будет построено кратчайшее дерево, т.е. определено множество кривых, соединяющих заданные точки и доставляющих минимум функционалу (?). Предложенный алгоритм, фактически, является обобщением известного алгоритма Прима [Kor2005].

### Пример

Приведем иллюстрирующий пример. Пусть необходимо построить минимальное остовное дерево для 15 точек с координатами (2,20), (5,46), (10,95), (35,90), (55,80), (10,10), (10,84), (40,88), (45,47), (80,9), (90,45), (92,98), (98,4), (50,10) в области  $M = \{0 \leq x \leq 100, 0 \leq y \leq 100\}$ . Функция  $v(x, y)$  имеет сложную структуру и включает 4 усеченных конуса:

$$\begin{aligned} a_1(x, y) &= \frac{(x-25)^2 + (y-25)^2}{1 + (x-25)^2 + (y-25)^2}, & f_1(x, y) &= \max\{0.8, a_1(x, y)\}, \\ a_2(x, y) &= \frac{(x-25)^2 + (y-75)^2}{1 + (x-25)^2 + (y-75)^2}, & f_2(x, y) &= \max\{0.8, a_2(x, y)\}, \\ a_3(x, y) &= \frac{(x-75)^2 + (y-25)^2}{1 + (x-75)^2 + (y-25)^2}, & f_3(x, y) &= \max\{0.8, a_3(x, y)\}, \\ a_4(x, y) &= \frac{(x-75)^2 + (y-75)^2}{1 + (x-75)^2 + (y-75)^2}, & f_4(x, y) &= \max\{0.8, a_4(x, y)\}. \end{aligned}$$

$$f(x, y) = f_1(x, y) + f_2(x, y) + f_3(x, y) + f_4(x, y) - 3.$$

График функции  $v(x, y) = 1/f(x, y)$ , порождающей метрику, показан на рисунке ??.

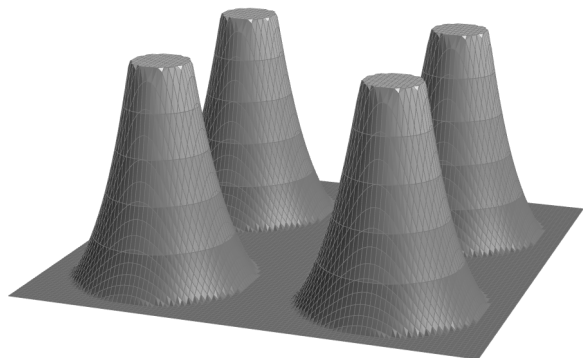


Рисунок 3. Функция  $v(x, y)$

На рисунке ?? представлены результаты решения: слева – с евклидовой метрикой ( $v(x, y) \equiv 1$ ), справа – с неевклидовой. Можно видеть, что построенные деревья отличаются друг от друга как по составу ребер, так и по их геометрии, поскольку в первом случае все ребра – отрезки прямых, а во втором – часть ребер имеет заметные искривления.

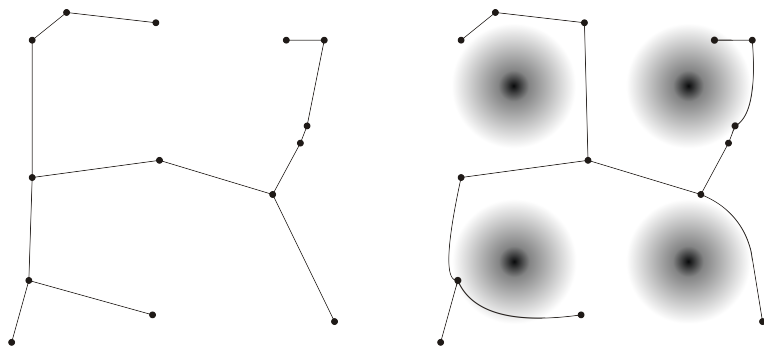


Рисунок 4. Результаты расчетов

## Заключение



Подводя итог выполненным исследованиям, отметим, что были усовершенствованы существующие и разработаны новые математическая модель и программно-вычислительные средства прогнозирования долгосрочного развития региональных топливно-энергетических комплексов (ТЭК) России и Монголии и входящих в них отраслевых систем.

Выполнен сравнительный анализ различных подходов, которые могут быть использованы при разработке программно-вычислительных средств для решения поставленных задач, показавший, что эффективным инструментарием является агентно-ориентированное имитационное моделирование (АИМ). Проведено обоснование выбора программных средств для создания АИМ ТЭК России и Монголии, разработаны её методические принципы и архитектура.








Математическая модель для задачи прокладки маршрутов протяженных энергетических объектов (трассировки ЛЭП, газопроводов и т.п.) имеет вид задачи вариационного исчисления. Для её решения разработан авторский алгоритм на основе оптико-геометрического подхода, развиваемого в последние годы авторами [[?Kaz2011](#), [?Kaz2013](#)].

Дальнейшие исследования будут связаны с программной реализацией предложенных алгоритмов, уточнением состава и функций агентов, разработкой критериев оценки эффективности вариантов развития топливно-энергетических комплексов двух стран. В результате этого появятся необходимые предпосылки и условия для проведения многовариантных сценарных расчетов, на основе которых будут определены приоритетные направления (сценарии) взаимовыгодного сотрудничества России и Монголии в энергетической сфере. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-510-94006 МОКНМ\_а.

## Список литературы

- [1] Н. И. Воропай, Б. Г. Санеев (ред.). *Восточный вектор энергетической стратегии России: современное состояние, взгляд в будущее*, Гео, Новосибирск, 2011, ISBN 978-5-904682-46-0, 368 с.  ↑
- [2] Н. И. Воропай, Б. Г. Санеев, С. Батхуяг, Х. Энхжаргал. «Энергетическое сотрудничество Монголии и России: современное состояние и стратегические направления», *Пространственная экономика*, 2013, №3, с. 108–122.  
 ↑
- [3] Б. Г. Санеев (ред.). *Топливо-энергетический комплекс Байкальского региона: современное состояние, перспективы развития*, Гео, Новосибирск, 2015, ISBN 978-5-906284-86-0, 176 с. ↑



- [4] Б. Г. Санеев, А. Д. Соколов, С. Ю. Музычук, Р. И. Музычук. «Методический подход к оценке показателей энергоэффективности экономики при изменении структуры топливно-энергетического баланса (на примере Байкальского региона)», *Пространственная экономика*, 2013, №4, с. 90–106.  ↑
- [5] А. А. Макаров, Л. А. Мелентьев. *Методы и модели оптимизации энергетического хозяйства*, Наука, Новосибирск, 1973, 274 с. ↑
- [6] Б. Г. Санеев (ред.). *Методы и модели разработки региональных энергетических программ*, Наука, Новосибирск, 2003, ISBN 5-02-032-038-2, 140 с. ↑
- [7] С. Батхуяг. *Научно-методические и практические вопросы разработки стратегии развития энергетики Монголии в новых социально-экономических условиях*, автореф. дисс. докт. техн. наук, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, 1997, 40 с. ↑
- [8] О. А. Николайчук, А. И. Павлов, А. Б. Столбов. «Анализ архитектур агентов и их представление в аспекте MDD-методологии», *ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении*, 2018, №5(9), с. 47–53.  ↑
- [9] А. В. Борщев. «Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика», *Exponenta Pro. Математика в приложениях*, 2004, №3, с. 38–47.  ↑
- [10] A. S Rao, M. P. Georgeff. “BDI-agents: from theory to practice”, *Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems, ICMAS'95* (June 12–14, 1995, San Francisco, California, USA), 1995, ISBN 0262621029, pp. 312–319.  ↑
- [11] О. А. Nikolaychuk, A. I. Pavlov, A. B. Stolbov. “Web-oriented software system for agent-based modeling driven by declarative specification of implementation process”, *Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications, RPC 2018* (August 18–25, 2018, Vladivostok, Russia), 2018, ISBN 9781538675328, pp. 398, 5 pp.  ↑
- [12] О. А. Nikolaychuk, A. I. Pavlov, A. B. Stolbov. «Модели и программные средства разработки агентных моделей на основе модельно-управляемого подхода», *Proceedings for First Scientific-practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems, ITAMS 2018* (5 September 2018, Irkutsk, Russian Federation), CEUR Workshop Proceedings, т. **2221**, 2018, с. 13–19 <http://ceur-ws.org/Vol-2221/paper3.pdf>. ↑
- [13] M. H. Moradi, S. Razini, S. M. Hosseinian. “State of art of multiagent systems in power engineering: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **58** (2016), pp. 814–824.  ↑
- [14] E. Gnansounou, J. Dong, S. Pierre, A. Quintero. “Market oriented planning of power generation expansion using agent-based model”, *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition* (October 10–13, 2004, New York, NY, USA), pp. 1306–1311.  ↑

- [15] J. F. Alfaro, S. A. Miller. “Planning the development of electricity grids in developing countries: An initial approach using Agent Based Models”, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology* (May 16–18, 2011, Chicago, IL, USA), 2011, pp. 1–6. doi ↑
- [16] M. Pipattanasomporn, H. Feroze, S. Rahman. “Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation”, *Proceedings of the IEEE PES Power systems conference and exposition*, PSCE’09 (March 15–18, 2009, Seattle, WA, USA), 2009, pp. 1–8. doi ↑
- [17] A. Saleem, N. Honeth, L. Nordstrom. “A case study of multi-agent interoperability in IEC 61850 environments”, *ISGT Europe* (October 11–13, 2010, Gothenberg, Sweden), 2010, pp. 1–8. doi ↑
- [18] А. Л. Казаков , А. А. Лемперт. «Об одном подходе к решению задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике», *Автоматика и телемеханика*, 2011, №7, с. 50–57. doi ↑
- [19] А. Л. Казаков , А. А. Лемперт, Д. С. Бухаров. «К вопросу о сегментации логистических зон для обслуживания непрерывно распределенных потребителей», *Автоматика и телемеханика*, 2013, №6, с. 87–100. doi ↑
- [20] K. W. Cassel. *Variational methods with applications in science and engineering*, University Press, Cambridge, 2013, ISBN 978-1107022584, 432 pp. ↑
- [21] Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. *Алгоритмы: построение и анализ*, 2-е, Вильямс, М., 2005, ISBN 5-8459-0857-4, 1296 с. ↑

Поступила в редакцию 27.08.2019

Переработана 23.10.2019

Опубликована 20.11.2019

Рекомендовал к публикации

д.ф.-м.н. И. В. Расина

*Пример ссылки на эту публикацию:*

А. Л. Казаков, А. А. Лемперт, А. Б. Столбов, Б. Г. Санеев, С. П. Попов. «Принципы создания технологии моделирования и прогнозирования развития региональных топливно-энергетических комплексов России и Монголии с учетом энергетического сотрудничества двух стран». *Программные системы: теория и приложения*, 2019, 10:4(43), с. 3–24.

doi 10.25209/2079-3316-2019-10-4-3-24



[http://psta.psiras.ru/read/psta2019\\_4\\_3-24.pdf](http://psta.psiras.ru/read/psta2019_4_3-24.pdf)

*Об авторах:*



**Александр Леонидович Казаков**

Доктор физико-математических наук ISEM профессор, главный научный сотрудник отделения 2. Прикладных проблем математической физики и теории поля ИДСТУ СО РАН



0000-0002-3047-1650

**e-mail:** kazakov@icc.ru



**Анна Ананьевна Лемперт**

Кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории 6.2. Логических и оптимизационных методов анализа сложных систем ИДСТУ СО РАН



0000-0001-9562-7903

**e-mail:** lempert@icc.ru



**Александр Борисович Столбов**

Кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории 6.2. Логических и оптимизационных методов анализа сложных систем ИДСТУ СО РАН



0000-0001-6513-7030

**e-mail:** stolboff@icc.ru



**Борис Григорьевич Санеев**

Доктор технических наук, профессор, зав. отделом комплексных и региональных проблем энергетики № 60 ИСЭМ СО РАН



0000-0002-0571-6986

**e-mail:** saneev@isem.irk.ru



**Сергей Петрович Попов**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела комплексных и региональных проблем энергетики № 60 ИСЭМ СО РАН



0000-0002-9060-2317

**e-mail:** popovsp@isem.irk.ru

Alexander L. Kazakov, Anna A. Lempert, Alexander B. Stolbov, Boris G. Saneev, Sergey P. Popov. *Principles of creating technology for modeling and forecasting the development of regional fuel and energy complexes of Russia and Mongolia in respect the energy cooperation between the two countries.*

**ABSTRACT.** The article relates to the creation of computational technology for scenario modeling and forecasting the interrelated development of the national fuel and energy complexes of Russia and Mongolia, taking into account the cross-country trade in fuel and energy resources. The study aims to create a methodological basis for determining the most promising options for bilateral interaction and, in turn, to evaluate the effectiveness of projects for energy cooperation between Russia and Mongolia. The scientific framework for the proposing technology follows principles of agent-based simulation modeling, according to which the objects under consideration became elements of a multi-agent system.

We describe the selection of the Adskit software for the creation of an agent-based simulation model (ABSM) of the fuel and energy system of Russia and Mongolia and a justification of the chosen instrument and propose methodological principles and architecture of ABSM. The mathematical model for the problem of laying routes of extended energy objects has the form of a particular case of the variational problem and deals with which the author's solution algorithm based on the principles of geometric optics.

*Key words and phrases:* computational technology, agent simulation, mathematical modeling, computational algorithm, energy cooperation, development scenarios, fuel and energy complex.

2010 *Mathematics Subject Classification:* 97R40; 91B32, 93A30

---


RFBR 18-510-94006.

© A. L. KAZAKOV<sup>(1)</sup> A. A. LEMPERT<sup>(2)</sup> A. B. STOLBOV<sup>(3)</sup> B. G. SANEEV<sup>(4)</sup> S. P. POPOV<sup>(5)</sup> 2019

© INSTITUTE FOR SYSTEM DYNAMICS AND CONTROL THEORY OF SB RAS<sup>(1, 2, 3)</sup> 2019

© MELENTIEV ENERGY SYSTEMS INSTITUTE SB RAS<sup>(4, 5)</sup> 2019







© PROGRAM SYSTEMS: THEORY AND APPLICATIONS (DESIGN), 2019

 10.25209/2079-3316-2019-10-4-3-24




## References


- [1] N. I. Voropay, B. G. Saneyev (red.). *The eastern vector of Russia's energy strategy: State of the art and prospects*, Geo, Novosibirsk, 2011, ISBN 978-5-904682-46-0 (in Russian), 368 pp. ↑
- [2] N. I. Voropay, B. G. Saneyev, S. Batkhuyag, Kh. Enkhzhargal. "Energy cooperation between Mongolia and Russia: current state and strategic directions", *Spatial Economics*, 2013, no.3, pp. 108–122 (in Russian). [URL](#) ↑
- [3] B. G. Saneyev (red.). *Fuel and energy complex of the Baikal region: current status, development prospects*, Geo, Novosibirsk, 2015, ISBN 978-5-906284-86-0 (in Russian), 176 pp. ↑
- [4] B. G. Saneyev, A. D. Sokolov, S. Yu. Muzychuk, R. I. Muzychuk. "Methodical approach to estimation of energy efficiency parameters of the economy under the structural changes in the fuel and energy balance (on the example of Baikal region)", *Spatial Economics*, 2013, no.4, pp. 90–106 (in Russian). [URL](#) ↑
- [5] A. A. Makarov, L. A. Melent'yev. *Methods and models for optimizing the energy economy*, Nauka, Novosibirsk, 1973 (in Russian), 274 pp. ↑
- [6] B. G. Saneyev (red.). *Methods and models for the development of regional energy programs*, Nauka, Novosibirsk, 2003, ISBN 5-02-032-038-2 (in Russian), 140 pp. ↑
- [7] S. Batkhuyag. *Scientific, methodological and practical issues of developing a development strategy for Mongolia's energy in the new socio-economic conditions*, avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk, In-t sistem energetiki im. L.A. Melent'yeva SO RAN, Irkut-sk, 1997 (in Russian), 40 pp. ↑
- [8] O. A. Nikolaychuk, A. I. Pavlov, A. B. Stolbov. "An agent architectures analysis and their representation in the aspect of MDD-methodology", *ITNOU: Informatsionnyye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii*, 2018, no.5(9), pp. 47–53 (in Russian). ↑
- [9] A. V. Borshchev. "Practical agent modeling and its place in the arsenal of analysts", *Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh*, 2004, no.3, pp. 38–47 (in Russian). ↑
- [10] A. S Rao, M. P. Georgeff. "BDI-agents: from theory to practice", *Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems, ICMAS'95* (June 12–14, 1995, San Francisco, California, USA), 1995, ISBN 0262621029, pp. 312–319. [URL](#) ↑
- [11] O. A. Nikolaychuk, A. I. Pavlov, A. B. Stolbov. "Web-oriented software system for agent-based modeling driven by declarative specification of implementation process", *Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications, RPC 2018* (August 18–25, 2018, Vladivostok, Russia), 2018, ISBN 9781538675328, pp. 398, 5 pp. [DOI](#) ↑
- [12] O. A. Nikolaychuk, A. I. Pavlov, A. B. Stolbov. "Models and software for agent-based model development based on model-driven approach", *Proceedings for First Scientific-practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems, ITAMS 2018* (5 September 2018, Irkutsk, Russian Federation), CEUR Workshop Proceedings, vol. **2221**, 2018, pp. 13–19 <http://ceur-ws.org/Vol-2221/paper3.pdf> (in Russian). ↑
- [13] M. H. Moradi, S. Razini, S. M. Hosseinian. "State of art of multiagent systems in power engineering: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **58** (2016), pp. 814–824. [DOI](#) ↑
- [14] E. Gnansounou, J. Dong, S. Pierre, A. Quintero. "Market oriented planning of power generation expansion using agent-based model", *IEEE PES Power*

- Systems Conference and Exposition (October 10–13, 2004, New York, NY, USA), pp. 1306–1311. ↑
- [15] J. F. Alfaro, S. A. Miller. “Planning the development of electricity grids in developing countries: An initial approach using Agent Based Models”, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology* (May 16–18, 2011, Chicago, IL, USA), 2011, pp. 1–6. ↑
  - [16] M. Pipattanasomporn, H. Feroze, S. Rahman. “Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation”, *Proceedings of the IEEE PES Power systems conference and exposition*, PSCE’09 (March 15–18, 2009, Seattle, WA, USA), 2009, pp. 1–8. ↑
  - [17] A. Saleem, N. Honeth, L. Nordstrom. “A case study of multi-agent interoperability in IEC 61850 environments”, *ISGT Europe* (October 11–13, 2010, Gothenberg, Sweden), 2010, pp. 1–8. ↑
  - [18] A. L. Kazakov, A. A. Lempert. “An approach to optimization in transport logistics”, *Autom. Remote Control*, **72**:7 (2011), pp. 1398–1404. ↑
  - [19] A. L. Kazakov, A. A. Lempert, D. S. Bukharov. “On segmenting logistical zones for servicing continuously developed consumers”, *Autom. Remote Control*, **74**:6 (2013), pp. 968–977. ↑
  - [20] K. W. Cassel. *Variational methods with applications in science and engineering*, University Press, Cambridge, 2013, ISBN 978-1107022584, 432 pp.↑
  - [21] Th. Cormen, Ch. Leyserson, R. Rivest, C. Stein. *Introduction to Algorithms*, 2nd, MIT Press and McGraw-Hill, 2001, ISBN 0-262-53196-8, 1180 pp.↑

*Sample citation of this publication:*

Alexander L. Kazakov, Anna A. Lempert, Alexander B. Stolbov, Boris G. Saneev, Sergey P. Popov. “Principles of creating technology for modeling and forecasting the development of regional fuel and energy complexes of Russia and Mongolia in respect the energy cooperation between the two countries”. *Program Systems: Theory and Applications*, 2019, **10**:4(43), pp. 3–24. (*In Russian*).

 10.25209/2079-3316-2019-10-4-3-24

 [http://psta.psiras.ru/read/psta2019\\_4\\_3-24.pdf](http://psta.psiras.ru/read/psta2019_4_3-24.pdf)