
УДК 004.9:338.2:621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В РОССИИ: РЕГИОНАЛЬНЫЙ РАЗРЕЗ

© 2019 г. А. С. Гордиенко¹, А. М. Лозинская¹ *, Д. В. Тетерина¹, Е. А. Шенкман¹

¹Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Пермь, Россия

*e-mail: alozinskaia@hse.ru

Поступила в редакцию 09.10.2018 г.

Российская энергосистема одна из крупнейших в мире централизованно управляемых систем. Присущую неоднородность территорий энергосистемы, как с точки зрения структуры потребления, так и разных климатических условий, важно учитывать при решении задачи планирования потребления. В работе исследуется взаимосвязь электропотребления и температуры окружающей среды на данных 64 российских регионов. Для выделения однородных по климатическим условиям групп регионов используется иерархический и неиерархический кластерный анализ, который позволил разделить выборку на три температурных кластера. Учитывая различные потребности в электроэнергии регионов, для каждого температурного кластера оценивается кусочно-линейная регрессия с эндогенной точкой переключения базовой температуры. В каждом кластере явно выражен как эффект охлаждения, так и эффект обогрева, однако базовый уровень температуры различен. В кластерах с умеренным и жарким климатом преобладает эффект охлаждения, а в кластере с холодным климатом — эффект обогрева. Учет этих эффектов при планировании потребления может привести к повышению точности прогноза, что важно для всех агентов оптового рынка электроэнергетики и функционирования энергетической системы России в целом.

Ключевые слова: оптовый рынок электроэнергии, температурные кластеры, базовая температура, эффект охлаждения, эффект обогрева

DOI: 10.1134/S0002331019010072

ВВЕДЕНИЕ

Потребление электроэнергии имеет тесную связь с погодными и климатическими условиями. Одним из ключевых климатических факторов является температура. В холодные/жаркие дни потребители приобретают и используют больше нагревательных/охлаждающих электроприборов, увеличивая тем самым объем потребляемой электроэнергии и расходы, связанные с ней. Этому способствует и глобальное изменение климата, включая потепление и другие температурные аномалии. Оценить степень влияния последнего на потребление электроэнергии представляется возможным через исследования связи температуры и потребления. Учет фактора температуры также важен для прогнозирования потребления и нагрузки энергетической сети в целях повышения потенциала энергетического сектора. Точное прогнозирование потребления электроэнергии на период от нескольких дней до нескольких лет имеет важное значение для работы энергетических компаний разных уровней. Для сбытовых энергетических и генерирующих компаний прогноз необходим для формирования заявок на покупку и поставку электроэнергии, соответственно, а также для планирования

своей деятельности. Прогнозирование потребления является важной задачей системного оператора энергетической системы России, точность прогноза которого непосредственно влияет на надежность функционирования энергетической системы в целом. На законодательском уровне прогнозирование потребления необходимо для разработки законодательных и регуляторных энергетических инициатив.

В данной работе, для повышения качества планирования потребления электроэнергии, исследуется взаимосвязь потребления электроэнергии и таких метеорологических факторов, как температура окружающей среды и влажность воздуха. Взаимосвязь потребления и температуры, как продемонстрировано в исследованиях [1, 2], может характеризоваться разной функциональной формой в зависимости от географического расположения территорий. Поэтому для повышения точности прогноза следует оценить функциональную форму зависимости для каждой отдельной территории. Однако, в условиях ограниченности вычислительных мощностей и централизованной диспетчеризации России, целесообразным является оценка функциональной формы для однородных групп территорий. С этой целью в работе используется алгоритм для выделения климатических кластеров на территории России, внутри которых предполагается одинаковый характер взаимосвязи потребления и температуры. Такой подход для моделирования электропотребления в России, насколько нам известно, ранее не использовался.

Другой особенностью работы является моделирование электропотребления посредством кусочно-линейной регрессии с эндогенной точкой разрыва, которая оценивается при идентификации модели для каждого климатического кластера, а не задается априорно или экспертно, как например, в работе [3]. Авторы в [4] обсуждают целесообразность применения такого подхода для повышения качества прогноза на данных потребления европейских стран. Данное исследование демонстрирует результат применения такого подхода на данных российских регионов.

Работа структурирована следующим образом. В следующем разделе представлен обзор литературы. Затем в работе описываются собранные данные и методология исследования. Завершают работу эмпирические результаты и выводы.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Существуют разные причины нелинейного характера взаимосвязи потребления электроэнергии и температуры окружающей среды. Основная причина заключается в том, что в холодное время года наблюдается эффект обогрева (heating effect), когда с увеличением температуры окружающей среды сокращается потребление электроэнергии, используемой для отопительных целей. В теплое же время года наблюдается эффект охлаждения (cooling effect), когда по мере роста температуры потребление электроэнергии растет, поскольку увеличивается использование охлаждающих электроприборов [1]. Поливное земледелие, характерное для южных регионов России, также объясняет повышенный спрос на электроэнергию при высокой температуре воздуха [3]. В работе [5] авторы отмечают, что по мере приближения к желаемой комфортной температуре (базовой температуре – reference temperature) взаимосвязь потребления электроэнергии и температуры становится менее крутой. Это объясняется тем, что при увеличении/уменьшении температуры окружающей среды сравнительно меньше энергии требуется для поддержания комфортного уровня температуры. Желаемую комфортную температуру авторы рассматривают как функцию от потребительских предпочтений, расходов, связанных с ее достижением, и дохода потребителя.

Нелинейная U-образная функциональная зависимость потребления электроэнергии и температуры окружающей среды объясняется ограниченной мощностью обогревающих/охлаждающих устройств [5], повышенным потреблением электроэнергии холодильным и морозильным оборудованием при высокой температуре окружающей

среды и разной реакцией потребителей на изменение температуры окружающей среды в виде экстенсивного и интенсивного эффектов изменения потребления¹.

Для исследования взаимосвязи температуры и ежедневного потребления электроэнергии широко используется такой показатель как количество градусо-суток (degree-days, градусо-дней), которые бывают отопительными и охлаждающими [4, 6]. Количество отопительных градусо-суток (Heating Degree Days, HDDs) и охлаждающих градусо-суток (Cooling Degree Days, CDDs) рассчитывается как количество дней, когда средняя суточная температура ниже и выше некоторого базового/комфортного уровня температуры. Предполагается, что для HDDs потребление электроэнергии сокращается линейно с увеличением температуры окружающей среды до базового уровня, а для CDDs — растет линейно при увеличении температуры выше базового уровня. Это определяет V-образную форму зависимости ежедневного электропотребления и температуры, которая сохраняется при работе с более частотными данными (например, часовыми или полчасовыми). В этом случае альтернативой градусо-суткам является количество градусов выше/ниже базового уровня температуры в каждый момент времени [4], данный подход и применяется в данной работе.

Базовый/комфортный уровень температуры определяется обычно визуально на основе имеющихся данных и чаще используется [7, 8] уровень в 18°C (65°F)². На данных российской энергосистемы в работе [3] авторы отмечают, что такой точкой переключения температуры является 17°C. Однако при таком априорном выборе уровня базовой температуры не учитывается тот факт, что он меняется в зависимости от характеристик местности, других климатических условий, кроме температуры, например, уровня влажности, осадков или ветра, и культурных предпочтений [12]. Например, в штате Массачусетс для коммерческого сектора этот уровень составил 12.8°C (55°F) и ниже 15.6°C (60°F) для населения [13]. Для штата Флорида в [14] использовался базовый уровень в 21.1°C (70°F). Авторы в [15] показали, что потребление электроэнергии в Испании сокращается до достижения базового уровня температуры в $18 \pm 3^\circ\text{C}$ ($65 \pm 37.4^\circ\text{F}$). В [16] было обнаружено, используя полупараметрическое моделирование электропотребления, что для Пермского края базовый уровень лежит в интервале от 17.3°C (63°F) до 21.1°C (70°F).

Естественно полагать, что эластичность потребления электроэнергии от температуры зависит от географического положения, которое, в свою очередь, определяет климатические условия того или иного географического объекта. В литературе выделяют несколько подходов для выделения схожих по температуре регионов. Один из подходов предполагает визуальный анализ взаимосвязи потребления электроэнергии и температуры, на основании которого авторы в [1] выделяют 3 группы из 15 европейских стран за период 1985–2000 гг.: страны с мягким, жарким и холодным климатом. Показано, что в странах с холодным климатом практически отсутствует эффект охлаждения. В странах с мягким климатом эффект обогрева преобладает над эффектом охлаждения. Оба эффекта явно выражены в странах с жарким климатом. К аналогичному выводу приходят в работе [2], исследуя выборку из 31 страны, включая страны-члены ОЭСР за период 1978–2000 гг. Используя более строгое деление на подгруппы (иерар-

¹ Более подробно экстенсивный и интенсивный эффекты изменения потребления в зависимости от температуры окружающей среды обсуждаются, например, в работе [9].

² По существующим российским нормам в сфере жилищно-коммунального хозяйства, например, ГОСТ Р 51617–2000 и ГОСТ 30494–2011, минимальная допустимая температура для жилых помещений (в зависимости от вида комнаты) составляет 18°C (65°F). Согласно рекомендациям по тепловому комфорту Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха [10], температура в диапазоне 68.5–75°F (20–23.9°C) является комфортной температурой для большинства людей, одетых по сезону. При этом во время отопительного сезона системы отопления включаются при понижении температуры окружающей среды ниже 18°C (65°F) для нагрева внутренних помещений до 20–23.3°C (68–74°F). Кроме того, Всемирная Организация Здравоохранения рекомендует поддерживать минимальную температуру в помещении 18°C (65°F) для здоровых людей, занятых офисной работой, и 20°C (68°F) для людей в группе риска [11].

Таблица 1. Описательные статистики основных переменных

	Среднее	Ст. откл.	Мин	Макс
Потребление электроэнергии, МВт ч	1713.05	2190.29	1	17242
Температура, °С	5.75	12.84	–38.7	40
Относительная влажность воздуха, %	71.20	20.68	0	100

хический кластерный анализ), авторы также выделяют 3 группы стран. При этом страны, принадлежащие к одному температурному кластеру, однородны с точки зрения отсутствия статистических различий в распределении температур.

ДАННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЯ

В работе используются трехчасовые данные³ об объемах фактически потребленной электроэнергии (МВт ч) за 2014 год, собранные с сайта балансирующего рынка электроэнергии и доступные для 64 регионов Российской Федерации⁴. Потребление электроэнергии является агрегированным для каждого региона, т.е. включает в себя потребление электроэнергии населением и предприятиями. Наиболее чувствительным к температуре является потребление электроэнергии населением [3, 12]. Однако в открытом доступе данные потребления электроэнергии населением за каждые три часа в региональном разрезе отсутствуют. Такое ограничение — использование агрегированного потребления — часто встречается в подобного рода исследованиях [1, 4]. Другим типичным ограничением является анализ потребления электроэнергии на национальном уровне, при котором не учитывается гетерогенность территорий внутри страны [17, 18]. Использование в текущей работе данных на региональном уровне отчасти позволяет нивелировать такое ограничение.

Трехчасовые данные о средней фактической температуре (°С) и средней относительной влажности воздуха (%) в регионах получены с информационного сайта о метеорологии RP5⁵. Описательные статистики климатических показателей и потребления электроэнергии представлены в табл. 1.

Известно, что влияние температуры воздуха на потребление электроэнергии варьируется в зависимости от типичных температурных условий на территории. Так, например, потребители электроэнергии в регионах с высокой и, наоборот, низкой среднемесячной температурой по-разному реагируют на изменение температуры [1, 2]. Для более детального изучения этих особенностей необходимо разбить регионы на однородные группы по температурным условиям. С этой целью на первом шаге исследования применяется кластерный анализ [19]. По аналогии с [2] в качестве признака разбиения на однородные группы выбрана среднемесячная температура.

Отметим, что для разбиения на кластеры последовательно применяются иерархический и неиерархический (к-средних) кластерный анализ. Иерархический кластерный анализ пошагово объединяет ближайшие объекты в группы до получения одного кластера. В результате строится дендрограмма всех возможных объединений в кластеры, на основании которой экспертно определяется количество выделяемых кластеров. Недостатком иерархического анализа является сложность и неоднозначность в

³ Поскольку метеорологические данные были доступны в трехчасовой динамике, то данные об объемах потребления также приведены к трехчасовой динамике. Для этого по каждому региону были рассчитаны средние объемы потребления электроэнергии за каждые три часа, что соответствует 8 наблюдениям для каждого суток в выборке.

⁴ Данные доступны только по регионам с нерегулируемой ценой на электроэнергию в 2014 г., которые относятся к двум ценовым зонам, данные собраны с сайта <http://br.so-ups.ru/Public/MainPage.aspx> (Дата обращения: 24.04.2015 г.).

⁵ RP5. [Электронный ресурс], URL: <http://rp5.ru> (Дата обращения: 13.12.2017 г.).

определении единственного и оптимального разбиения на кластеры (оптимального с точки зрения однородности регионов внутри кластеров). Однако с помощью данного метода можно выделить несколько вариантов того, на сколько кластеров можно разбить исходную выборку. А затем, среди этих вариантов с помощью метода k -средних выбрать оптимальное разбиение.

Для применения метода k -средних необходимо задать число кластеров k , от которого будет зависеть итоговое разбиение. В рамках данного подхода изначально задается k случайных точек (они генерируются случайным образом), после чего ближайшие к ним объекты объединяются в кластеры. Минусом подхода является его чувствительность к выбору начальных точек и количеству кластеров, поэтому для выбора лучшего решения и проверки устойчивости числа кластеров метод применяется несколько раз при разном заданном числе кластеров и разных начальных точках. В рамках данного исследования разные значения показателя k выбираются как возможные варианты разбиения на кластеры, полученные с помощью иерархического кластерного анализа, начальные точки генерируются случайным образом.

В методе k -средних метрикой расстояния между объектами является Евклидово расстояние, которое наиболее часто применяется в кластерном анализе. Данную метрику целесообразно использовать в случае, когда признаки объектов имеют одинаковую размерность [19]. В нашем случае признаками разбиения регионов на кластеры является средняя температура каждого месяца в 2014 г.

Для поиска оптимального разбиения на кластеры могут быть использованы различные критерии качества разбиения [20]. В данной работе используется индекс Калински–Харабас CH , который устойчив к разной размерности кластеров и к наличию близких друг к другу кластеров [20]. Оптимальному разбиению на кластеры соответствует максимальное значение индекса CH :

$$CH = \frac{\sum_i n_i d^2(c_i, c)/(k-1)}{\sum_i \sum_{x \in C_i} d^2(x, c_i)/(n-k)},$$

где CH – значение индекса Калински–Харабас, n – число наблюдений в выборке, n_i – число объектов в кластере, c – центр по всей выборке, C_i – кластер C_i , c_i – центр кластера, C_i , $d(x, y)$ – расстояние между x и y , k – число кластеров, $i = 1, \dots, k$.

Вторым шагом является моделирование V-образной функциональной формы зависимости потребленной электроэнергии от температуры воздуха в каждом из полученных кластеров. С этой целью для каждого температурного кластера регионов ($i = \overline{1, k}$) оценивается кусочно-линейная регрессия с эндогенной точкой перелома температуры θ_i [21] следующего вида:

$$L_{it} = \begin{cases} \alpha_{1i} + \beta_{1i}T_{it} + \gamma_i Hm_{it} + \sum_{j=1}^{11} \delta_{1ij}M_{jt} + \sum_{j=1}^6 \delta_{2ij}D_{jt} + \sum_{j=1}^7 \delta_{3ij}Hr_{jt} + \delta_{4i}Hl_t + \\ + \sum_{j=1}^{n_i} \eta_{ij}R_{ijt} + \varepsilon_{1it}, & T_{it} < \theta_i, \\ \alpha_{2i} + \beta_{2i}T_{it} + \gamma_i Hm_{it} + \sum_{j=1}^{11} \delta_{1ij}M_{jt} + \sum_{j=1}^6 \delta_{2ij}D_{jt} + \sum_{j=1}^7 \delta_{3ij}Hr_{jt} + \delta_{4i}Hl_t + \\ + \sum_{j=1}^{n_i} \eta_{ij}R_{ijt} + \varepsilon_{2it}, & T_{it} \geq \theta_i, \end{cases}$$

где L – объем потребления электроэнергии, Hm – относительная влажность воздуха, M_j – индикаторные переменные на месяц j ($j = \overline{1, 11}$), D_j – индикаторные переменные

на день недели j ($j = \overline{1,6}$), Hr_j – индикаторные переменные на 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21-ый часы сут ($j = \overline{1,7}$), HL – индикаторная переменная на государственные праздники, R_j – индикаторные переменные на регион j ($j = \overline{1, n_i}$), T – температура воздуха, θ_i – эндогенная точка перелома температуры, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \gamma, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \eta$ – неизвестные параметры уравнения регрессии, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – случайные ошибки.

Индикаторные переменные M_j, D_j, Hr_j позволяют учесть месячные, дневные и часовые сезонные колебания потребления электроэнергии. Подтверждение значимости сезонных компонент в динамике потребления электроэнергии было обнаружено ранее в зарубежных странах [15, 17] и на данных российских регионов [22–24]. Для индикаторных переменных в качестве базового месяца, дня, часа используются январь, воскресенье, полночь, соответственно. Включение индикаторной переменной HL объясняется тем, что потребление электроэнергии, главным образом в промышленном секторе, заметно уменьшается во время праздников [17]. В данной работе к таковым относятся официально установленные в 2014 г. дни государственных праздников в России, а также будние дни, которые стали выходными из-за переноса официальных праздников, попавших на субботу или воскресенье.

Среди метеорологических факторов, влияющих на потребление электроэнергии, кроме температуры T , учитывается относительная влажность воздуха Hm . В литературе обычно данный фактор выделяют вторым после температуры по степени влияния на прогнозную силу модели электропотребления [15, 18, 22]. Ожидается, что потребление электроэнергии варьируется в регионах внутри кластеров в силу различной экономической ситуации, уровня производства, численности населения и пр. С этой целью в модель включены индикаторные переменные на регионы R_j .

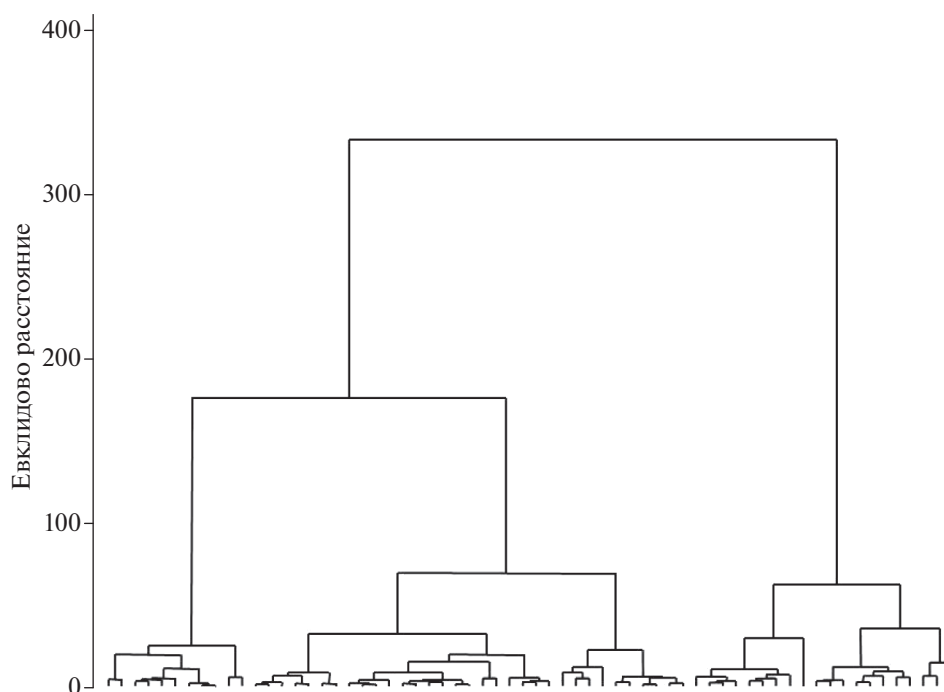
Независимая переменная температура воздуха T разбивается на два интервала с точкой переключения θ_i , после которой зависимость потребления электроэнергии от температуры меняется. Для того чтобы функция была непрерывна в точке перелома, накладывается условие на коэффициенты:

$$\alpha_{1i} + \beta_{1i}\theta_i = \alpha_{2i} + \beta_{2i}\theta_i.$$

С учетом условия уравнение регрессии принимает вид:

$$L_{it} = \begin{cases} \alpha_{1i} + \beta_{1i}T_{it} + \gamma_i Hm_{it} + \sum_{j=1}^{11} \delta_{1ij}M_{jt} + \sum_{j=1}^6 \delta_{2ij}D_{jt} + \sum_{j=1}^7 \delta_{3ij}Hr_{jt} + \delta_{4i}HL_t \\ + \sum_{j=1}^{n_i} \eta_{ij}R_{ijt} + \varepsilon_{1it}, & T_{it} < \theta_i, \\ (\alpha_{1i} + \theta_i(\beta_{1i} - \beta_{2i})) + \beta_{2i}T_{it} + \gamma_i Hm_{it} + \sum_{j=1}^{11} \delta_{1ij}M_{jt} + \sum_{j=1}^6 \delta_{2ij}D_{jt} + \\ + \sum_{j=1}^7 \delta_{3ij}Hr_{jt} + \delta_{4i}HL_t + \sum_{j=1}^{n_i} \eta_{ij}R_{ijt} + \varepsilon_{2it}, & T_{it} \geq \theta_i. \end{cases}$$

Так, при превышении порогового значения θ меняется угол наклона и свободный член функции зависимости потребления электроэнергии от температуры воздуха. Значения неизвестных параметров уравнения регрессии находятся итеративно с помощью метода Гаусса–Ньютона [25] путем минимизации квадрата ошибок.



ЭМПИРИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Выделение подгрупп однородных регионов в работе проводилось на основании показателя средней температуры месяца. Описательные статистики по исследуемым переменным в разрезе кластеров представлены в табл. 3.

[illegible]

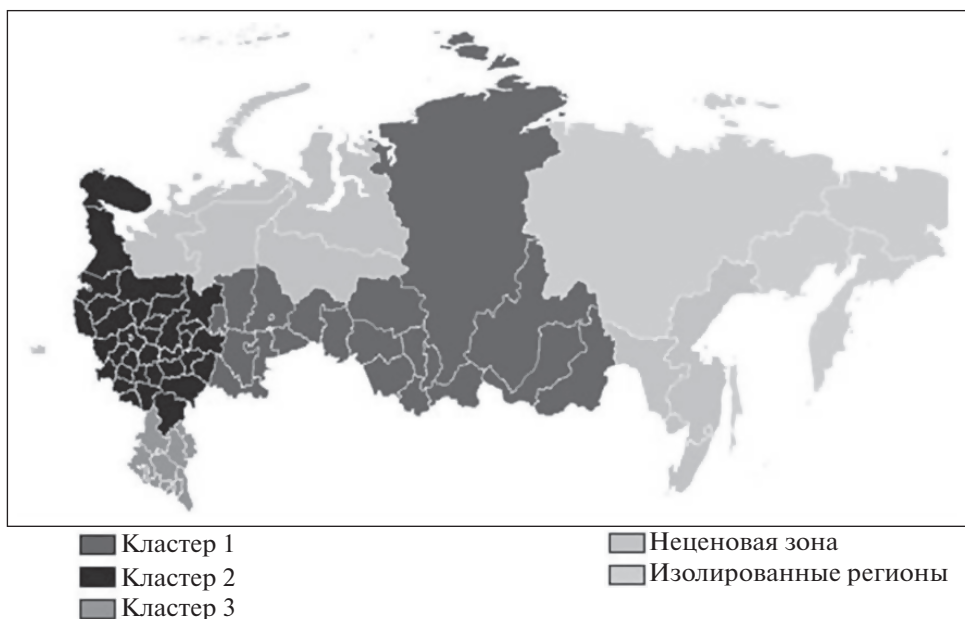


Рис. 2. Климатические кластеры России.

Отметим, что средние значения температуры в кластерах статистически значимо различаются (на 1% уровне значимости), о чем свидетельствуют результаты теста Стьюдента на равенство средних. Статистически значимые различия в средних значениях температуры между кластерами сохраняются и для отдельно взятого месяца. Таким образом, в исследуемой выборке присутствуют три температурных кластера: кластеры с холодным (кластер 1), умеренным (кластер 2) и жарким (кластер 3) климатом. К аналогичному выводу о существовании температурных кластеров стран пришли авторы в [1, 2].

Таблица 3. Описательные статистики основных переменных в разрезе полученных кластеров

	Среднее	Ст. откл.	Мин	Макс
Потребление электроэнергии (МВт ч)				
1 кластер	2736.38	2512.20	1	12391
2 кластер	1457.30	2071.40	127	17242
3 кластер	735.72	884.64	11	4061
Температура (градусы Цельсия)				
1 кластер	2.16	14.42	−38.7	40
2 кластер	6.07	11.80	−33.33	37.8
3 кластер	10.96	11.00	−28	39.4
Относительная влажность воздуха (%)				
1 кластер	69.32	20.30	0	100
2 кластер	72.46	20.70	0	100
3 кластер	70.52	21.02	0	100

В температурных кластерах также наблюдаются статистически значимые различия (на 1% уровне значимости) в средних объемах потребления электроэнергии и относительной влажности воздуха. Об этом свидетельствуют результаты теста Стьюдента на равенство средних. Ожидаемо, что наибольшее и наименьшее потребление электроэнергии характерно для кластера с холодным и жарким климатом, соответственно (табл. 3). Однако, высокие значения стандартного отклонения для потребления отражают неоднородность электропотребления, которая сохраняется внутри кластеров. Это связано с тем, что в температурные кластеры входят регионы с разным уровнем промышленного потребления электроэнергии и с разным количеством населения.

Для обнаружения характера зависимости среднего потребления кластера и температуры используется нормированное потребление. За счет нормировки удастся исключить влияние сильной неоднородности регионов по потреблению внутри кластеров. Можно заметить на рис. 3, что характер зависимости потребления электроэнергии и температуры различается по кластерам, но сохраняет свою нелинейность. Визуальный анализ не позволяет выделить единственную точку переключения, но позволяет определить интервал, в который она попадает — от 15 до 25°C для каждого кластера.

Результаты оценивания кусочно-линейной регрессии для каждого из кластеров представлены в табл. 4. Характер влияния относительной влажности воздуха на электропотребление различен в кластерах. Повышение уровня влажности ведет к статистически значимому росту спроса на электроэнергию в кластере с умеренным климатом. Однако для регионов с холодным климатом рост влажности воздуха приводит к статистически значимому падению потребления электроэнергии. Отрицательный эффект влажности в холодное время года также был обнаружен ранее [26, 27]. Такой результат можно объяснить тем, что влажность воздуха влияет на электропотребление косвенно через воспринимаемую потребителями температуру воздуха [18]. В праздничные дни потребление электроэнергии ожидаемо ниже. Коэффициенты при индикаторных переменных, отвечающих за сезонные колебания, также имеют ожидаемые знаки.

По результатам расчетов во всех кластерах при температуре ниже точки переключения с повышением температуры потребление электроэнергии статически значимо падает. Все меньше электроэнергии необходимо для обогрева помещений. В данном случае эффект обогрева уменьшается по мере приближения к точке переключения. При более высокой температуре, наоборот, рост температуры воздуха ведет к статистически значимому росту потребления электроэнергии, что объясняется эффектом охлаждения. Оба эффекта явно выражены во всех кластерах. Точки переключения в регионах с холодным, умеренным и жарким климатом равны 20.10, 20.76 и 24.39°C соответственно. Более “поздняя” точка переключения получена в кластере регионов с жарким климатом. Аналогично более высокий порог переключения был выявлен для регионов с жарким климатом и стран в работах [4, 12]. Как можно заметить, полученные оценки температуры отличаются от широко используемого базового уровня температуры 18°C, что подтверждает целесообразность выделения температурных кластеров. Отметим также, что к 1-му кластеру относится Пермский край, который был исследован в [16]. Авторы обнаружили, что точка базовой температуры для Пермского края лежит в интервал от 17.3 до 21.1°C, что соотносится с результатами текущего исследования.

Отметим, что V-образная функциональная форма зависимости электропотребления и температуры не является симметричной в каждом кластере. Для кластеров с умеренным и жарким климатом после точки переключения наклон линии регрессии круче, чем до точки переключения. Однако для кластера с холодным климатом ситуация обратная, электропотребление более чувствительно к холодной температуре. Та-

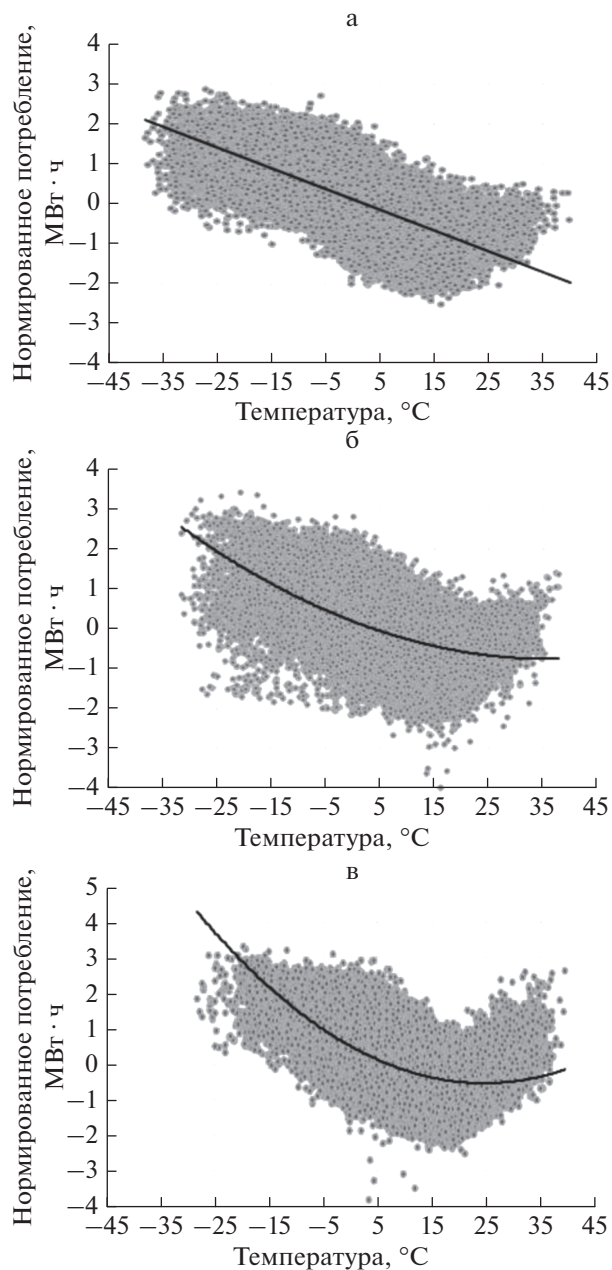


Рис. 3. Взаимосвязь среднего по кластеру нормированного потребления электроэнергии и температуры: (а) – первый кластер, (б) – второй кластер, (в) – третий кластер.

ким образом, в кластерах с умеренным и жарким климатом преобладает эффект охлаждения, а в кластере с холодным климатом – эффект обогрева.

Угол наклона линии регрессии после точки переключения монотонно растет по кластерам (от холодного климата к жаркому климату). Это означает, что в кластере с

Таблица 4. Результаты оценивания кусочно-линейной регрессии по кластерам

Переменные	1 кластер	2 кластер	3 кластер
Влажность воздуха	−0.73*** (0.08)	0.51*** (0.08)	−0.02 (0.06)
Праздники	−71.95*** (4.56)	−109.30*** (5.14)	−43.42*** (3.64)
Точка переключения температуры θ	20.10 [19.21; 20.99]	20.76 [20.08; 21.47]	24.39 [24.03; 24.75]
Температура воздуха ниже θ (β_1)	−7.52 [−7.88; −7.16]	−8.69 [−9.14; −8.24]	−6.53 [−6.93; −6.13]
Температура воздуха выше/равно θ (β_2)	5.94 [3.93; 7.95]	10.27 [7.95; 12.60]	18.01 [16.26; 19.75]
Контрольные переменные	Час, день недели, месяц, регион	Час, день недели, месяц, регион	Час, день недели, месяц, регион
Скорректированный коэффициент детерминации	0.97	0.97	0.99
Количество наблюдений	55476	99211	32120

Базовыми категориями для контрольных индикаторных переменных являются январь, воскресенье, полночь; в 1 кластере – Курганская область, во 2 кластере – Белгородская область, в 3 кластере – Астраханская область. В круглых скобках указаны стандартные ошибки, в квадратных – 95% доверительные интервалы для коэффициентов регрессии. *, **, *** – уровни значимости 10, 5 и 1% соответственно.

жарким климатом угол наклона наиболее крутой. Одним из возможных объяснений является лучшая “приспособленность” к жарким погодным условиям регионов третьего кластера. А именно в таких регионах большее распространение получили системы кондиционирования, что также отмечают в [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Региональные энергетические системы характеризуются гетерогенностью структуры электропотребления и климатических условий территорий, входящих в их состав, что важно учитывать при планировании и прогнозировании объемов потребления. Однако построение модели электропотребления для каждого региона является затратным. Поэтому в данной работе модель потребления электроэнергии строится отдельно для каждого кластера регионов с применением кусочно-линейной регрессии с эндогенной точкой переключения базовой температуры.

В работе предложен алгоритм выделения однородных групп регионов, который состоит из последовательного применения иерархического и неиерархического кластерного анализа с проверкой устойчивости полученных результатов с помощью критерия Калински–Харабас. Алгоритм апробирован на данных 64 регионов Российской Федерации за 2014 г., в результате чего было выделено три температурных кластера, условно обозначенных как “холодный”, “умеренный” и “жаркий”.

Рассчитанные разные уровни базовой температуры в климатических кластерах отличаются от общепринятого уровня в 18°C. Это подтверждает необходимость идентификации точки переключения температуры как эндогенного, а не заданного априорно параметра в модели электропотребления.

Результаты оценивания кусочно-линейной регрессии для температурных кластеров свидетельствуют о наличии и эффекта обогрева и эффекта охлаждения в каждом кластере. Однако для “холодного” кластера в большей степени характерен эффект обогрева, а для “умеренного” и “жаркого кластеров” – эффект охлаждения.

Предложенный подход в дальнейшем может быть использован для выделения однородных групп любых территорий, как внутри отдельно взятой страны, так и за ее пределами. В качестве переменных, по которым проводится кластеризация, может выступать не только среднемесячный уровень температуры, но и другие метеорологические показатели и продолжительность светового дня. Направлением дальнейшего исследования может быть анализ чувствительности электропотребления к температуре с помощью применения кусочно-линейной регрессии с несколькими точками переключения, которые могут задаваться как априорно, так и оцениваться, как отдельный параметр в модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bessec M., Fouquau J. The non-linear link between electricity consumption and temperature in Europe: A threshold panel approach // *Energy Economics*. 2008. V. 30. № 5. P. 2705–2721.
2. De Cian E., Lanzi E., Roson R. Seasonal temperature variations and energy demand // *Climatic Change*. 2013. V. 116. № 3–4. P. 805–825.
3. Макоклюев Б.И., Антонов А.В., Полижаров А.С., Тупицин И.В., Гилева С.С. Влияние метеофакторов на режимы потребления электроэнергии энергосистем. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 65. Надежность либерализованных систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы. ИСЭМ СО РАН, 2015.
4. Wang Y., Bielicki J.M., Acclimation and the response of hourly electricity loads to meteorological variables // *Energy*. 2018. V. 142. P. 473–485.
5. Henley A., Peirson J. Non-Linearities in Electricity Demand and Temperature: Parametric Versus Non-Parametric Methods // *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*. 1997. V. 59. № 1 P. 149–162.
6. Auffhammer M., Mansur E.T. Measuring climatic impacts on energy consumption: A review of the empirical literature // *Energy Economics*. 2014. V. 46. P. 522–530.
7. Gupta P.C., Yamada K. Adaptive Short-Term Forecasting of Hourly Loads Using Weather Information // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1972. V. PAS-91. P. 2085–2094.
8. Fan S., Hyndman R.J. The price elasticity of electricity demand in South Australia // *Energy Policy*. 2011. V. 39. № 6. P. 3709–3719.
9. Li J., Yang L., Long H. Climatic impacts on energy consumption: Intensive and extensive margins // *Energy Economics*. 2018. V. 71. P. 332–343.
10. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) (2004). Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering.
11. Public Health England (2014). Minimum home temperature thresholds for health in winter – A systematic literature review. London: Public Health England.
12. Brown M.A., Cox M., Staver B., Baer P. Modeling climate-driven changes in U.S. buildings energy demand // *Climatic Change*. 2016. V. 134. P. 29–44.
13. Amato A.D., Ruth M., Kirshen P., Horwitz J. Regional energy demand responses to climate change: methodology and application to the commonwealth of Massachusetts // *Climatic Change*. 2005. V. 71. № 1–2. P. 175–201.
14. Sailor D.J. Relating residential and commercial sector electricity loads to climate – evaluating state level sensitivities and vulnerabilities // *Energy*. 2001. V. 26. P. 645–657.
15. Valor E., Meneu V., Caselles V. Daily air temperature and electricity load in Spain // *J. of Applied Meteorology*. 2001. V. 40. № 8. P. 1413–1421.
16. Ожегов Е.М., Попова Е.А. Спрос на электроэнергию и погода в регионе: непараметрический подход // *Прикладная эконометрика*. 2017. V. 2. № 46. P. 55–73.
17. Pardo A., Meneu V., Valor E. Temperature and seasonality influences on Spanish electricity load // *Energy Economics*. 2002. V. 24. № 1. P. 55–70.
18. Apadula F., Bassini A., Elli A., Scapin S. Relationships between meteorological variables and monthly electricity demand // *Applied Energy*. 2012. V. 98. P. 346–356.
19. Kaufman L., Rousseeuw P.J. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
20. Liu Y., Li Z., Xiong H., Gao X., Wu J. Understanding of internal clustering validation measures // *IEEE 10th International Conference on Data Mining*. 2010. P. 911–916.
21. Bacon D.W., Watts D.G. Estimating the Transition Between Two Intersecting Straight Lines // *Biometrika*. 1971. V. 58. № 3. P. 525–534.

22. *Маюков Б.И.* Анализ и планирование электропотребления. Москва: Энергоатомиздат, 2008.
23. *Быков Ф.Л., Гордин В.А.* Краткосрочный прогноз часового потребления электроэнергии с учетом погоды для субъектов РФ // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 5. Р. 47–56.
24. *Попова Е.А., Чадов А.Л.* Моделирование оптового рынка электроэнергии макрорегиона с помощью непрерывно-дискретных моделей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 3. Р. 26–38.
25. *Bruin J.* Newtest: command to compute new test // UCLA: Statistical Consulting Group. 2006.
26. *Badr E.A., Nasr G.E.* On the relationship between electrical energy consumption and climate factors in Lebanon: co-integration and error-correction models // International Journal of Energy Research. 2001. V. 25. № 12. P. 1033–1042.
27. *Hor C.L., Watson S.J., Majithia S.* Analyzing the impact of weather variables on monthly electricity demand // IEEE transactions on power systems. 2005. V. 20. № 4. P. 2078–2085.

Research on Relationship between Electricity Consumption and Air Temperature in Russia: Regional View

A. S. Gordienko^a, A. M. Lozinskaia^{a, #}, D. V. Teterina^a, and E. A. Shenkman^a

^aNational Research University Higher School of Economics, Perm, Russia

[#]e-mail: alozinskaia@hse.ru

Russian energy system is one of the largest among centralized ones in the world. For electricity consumption planning it is essential to consider heterogeneity of energy system areas in terms of both consumption structure and climate conditions. In this paper, the relationship of electricity consumption and air temperature is investigated on the data for 64 Russian regions. Hierarchical and non-hierarchical cluster analysis is employed to form homogeneous groups of regions: three temperature clusters are retrieved. Bearing in mind different electricity needs in regions, linear piecewise regression with endogenous reference temperature is estimated for each temperature cluster. In all clusters both cooling and heating effects are clearly observable but reference temperature differs. For the clusters of hot and middle climate regions cooling effect prevails, while heating effect dominates in the cold regions cluster. These effects consideration in energy consumption planning may result in a higher quality of forecasting. This is of a great importance for wholesale electricity market agents and functioning of Russian energy system as a whole.

Keywords: wholesale electricity market, temperature clusters, reference temperature, cooling effect, heating effect