

В.С. Дехнич¹

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЁМОВ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ГОРОДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ РАЗЛИЧНОЙ ДЕТАЛЬНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Осуществлён сравнительный анализ оригинальных методик моделирования объёмов выбросов парниковых газов урбанизированных территорий от источников коммунального и транспортного сектора в разрезе планировочных районов городов, ограниченных элементами транспортной сети и характеризующихся относительно однородной застройкой. Указанные методики позволяют рассчитывать выбросы парниковых газов от таких источников коммунального сектора, как выработка электрической и тепловой энергии, сжигание газа на бытовые нужды. Расчёт выбросов от источников транспортного сектора включает их дифференциацию по отдельным сегментам улиц. Описанные методики соответствуют различным уровням детальности исследования, включая: переход от агрегированных значений к объёмам выбросов отдельных районов города (downscaling) пропорционально факторам энергопотребления; расчёты с использованием нормативов энергопотребления; расчёты с использованием фактических данных об энергопотреблении. Рассмотренные методики апробированы на примере г. Нур-Султан, который является одним из наиболее крупных в Республике Казахстан. Результаты расчётов близки к фактическим значениям выбросов рассмотренного города. Описаны преимущества и недостатки рассмотренных методик. Рассмотрены факторы, приводящие к неточности результатов. Подтверждено, что рассмотренные методики могут использоваться для планирования мер климатической политики, т.к. они позволяют выделить районы города и сферы деятельности, которые вносят максимальный вклад в формирование выбросов парниковых газов, и, следовательно, являются первоочередными объектами таких мер. Описана особая значимость рассмотренных методик для городов постсоветского пространства, для которых характерно отсутствие развитых систем мониторинга выбросов парниковых газов и возникает необходимость производить расчёт выбросов парниковых газов с применением косвенных источников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изменение климата, оценка выбросов парниковых газов, г. Нур-Султан

Vladimir S. Dekhnych²

MODELING VOLUMES EMISSIONS OF GREENHOUSE GAS IN CITIES USING DATA WITH VARIOUS DETAILS

ABSTRACT

A comparative analysis of the original methods of modeling urban greenhouse gas emissions caused by communal and transport sectors was carried out. These methods provide information at the level of urban-planning areas limited by the elements of the transport network

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Казахстанский филиал, ул. Кажымукана, д. 11, 010000, Нур-Султан, Республика Казахстан; *e-mail*: vodo.ast@gmail.com

¹ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Kazakhstan Branch, Kazhymukhan str, 11, 010000, Nur-Sultan, The Republic of Kazakhstan; *e-mail*: vodo.ast@gmail.com

and characterized by relatively similar buildings. These methods make possible to calculate greenhouse gas emissions from sources of the public sector, such as electricity and heat generation, gas burning for domestic needs. Calculation of emissions from sources of the transport sector includes differentiation by individual street segments. The described methods correspond to different accuracy levels including: the transition from aggregated values to the amount of emissions of individual areas of the city (downscaling); calculations using energy standards; calculations using actual energy consumption data. The considered methods have been tested on the example of the city of Nur-Sultan, that is one of the largest in the Republic of Kazakhstan. The calculation results are close to the actual values of Nur-Sultan's emission. The advantages and disadvantages of the considered methods are described. The factors leading to inaccurate results are considered. It was confirmed that the considered methods can be used for planning climate policy measures, since they allow to identify areas of the city and fields of activity that make the maximum contribution to the formation of greenhouse gas emissions. The considered methods are significant for the cities of the former Soviet Union, which are characterized by the absence of developed systems for monitoring greenhouse gas emissions, is described, and it becomes necessary to calculate greenhouse gas emissions using indirect sources.

KEYWORDS: climate change, calculation of greenhouse gas emission, Nur-Sultan (the city)

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата признается мировым сообществом одной из важнейших глобальных проблем, последствия которой достаточно серьезны и включают изменение уровня Мирового океана, приводящее к затоплению ценных территорий, увеличение частоты и интенсивности неблагоприятных и опасных метеорологических явлений, дефицит водных ресурсов, распространение заболеваний и др. [Climate Change..., 2014].

Одной из причин изменения климата являются антропогенные выбросы парниковых газов (ПГ). Антропогенные выбросы парниковых газов связаны, главным образом, с добычей и переработкой ископаемого топлива [там же]. Доля глобальных выбросов от такой деятельности составляет около 84 %. В целом, по миру наиболее значимы среди таких процессов операции топливно-энергетического сектора (30,3 %) и разного рода технологические выбросы и потери (33,7 %). Интересно, что доля выбросов от транспорта относительно невелика (9 %), что отличается от ситуации с выбросами загрязняющих веществ, где транспорт в большинстве случаев является доминирующим источником, особенно в городах.

В этой связи с конца 80-х гг. XX в. развивается так называемая «климатическая политика» — комплекс мер, направленных на смягчение процесса изменения климата и адаптацию к нему, осуществляемых в различных секторах и на разных уровнях деятельности человека [Akhmad, 2009]. Осуществление климатической политики может в разы снизить ожидаемый прирост выбросов в будущем. По прогнозным моделям ИРСС разница в объемах выбросов ПГ между сценарием с применением наиболее эффективных мер климатической политики и полным отказом от таких мер очень велика. В первом случае глобальные нетто (с учётом поглощения) выбросы ПГ к 2100 г. могут стать близкими к нулю или даже отрицательными, в то время как во втором случае они могут превысить значение в 150 Гт CO₂ экв./год [Climate Change..., 2014].

Особенно актуально ведение климатической политики на уровне отдельных городов, т.к. в целом по миру города занимают менее 1 % площади, но в них проживает более 50 % населения планеты. При этом города потребляют около 80 % всей производимой энергии мира и выбрасывают около 75 % ПГ.

Эффективное снижение выбросов в городах невозможно без получения объективной и точной информации об их объемах и структуре в разрезе отдельных

районов города, а также прогноза изменения объёмов с течением времени в зависимости от реализованных мер. Инструментом, способным предоставить такую информацию, может стать моделирование изменения объёмов выбросов парниковых газов.

К настоящему времени разработано большое количество моделей, способных оценивать текущий объём выбросов ПГ в городах, а также прогнозировать его изменение [Ramasmami et al., 2011; Gurney, 2012; Choi et al., 2014; Henderson, Hart, 2013; Abdullah, Pauzi, 2015]. Большинство таких моделей апробированы на примере городов США и ЕС, т.к. в этих регионах уже в настоящее время функционируют системы торговли выбросами, субъектами которых являются отдельные муниципалитеты, а не государство в целом. Многие из таких моделей [Gurney, 2012] основаны на использовании регулярно осуществляющегося мониторинга выбросов ПГ, иногда с использованием натуральных измерений. Однако, в отличие от европейских и североамериканских муниципалитетов, города постсоветского пространства зачастую не обладают столь развитой системой наблюдения за выбросами ПГ. Например, в Республике Казахстан на данный момент отсутствуют опубликованные Комитетом по статистике или уполномоченными исполнительными органами данные о выбросах в разрезе городов или областей. В этой связи при планировании мер климатической политики возникает необходимость расчёта выбросов ПГ городов с использованием косвенных источников данных, что может вносить достаточно высокую долю неопределённости в расчёты.

В данной работе произведён сравнительный анализ результатов моделирования выбросов ПГ городов с применением исходных данных различной детальности. В качестве исследуемой территории была выбрана столица Республики Казахстан — г. Нур-Султан. Причиной выбора послужили следующие факторы:

- Казахстан, участвуя в Парижском соглашении, принимает достаточно жёсткие обязательства по снижению выбросов ПГ¹, и, следовательно, осуществление климатической политики в государстве достаточно актуально;
- г. Нур-Султан является одним из наиболее крупных в Республике;
- в пределах города присутствуют различные типы источников выбросов ПГ, что позволяет апробировать несколько методов расчёта;
- по причине того, что город Нур-Султан является самостоятельной административной единицей, приравненной по значимости к областям Республики, для него имеется достаточно большое количество опубликованных статистических данных, что позволяет апробировать методы расчёта с применением данных различной детальности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенностью выбросов ПГ в городах является преобладание рассеянных источников. Рассеянные (неточечные, nonpoint (англ.)) источники включают выбросы загрязнителей индивидуального и среднемасштабного образования, которые при инвентаризации по практическим причинам не могут рассматриваться как точечные источники загрязнения². Многие модели [Дехнич, 2015; Дехнич, Дронин, 2017; Choi et al., 2014; Henderson, Hart, 2013] объединяют рассеянные источники в группы на основании схожести параметров и территориальной близости. Такой подход позволяет выявить сферы деятельности, приводящие к максимальному количеству выбросов ПГ, а также выявить районы, в которых внедрение мер по смягчению последствий изменения климата

¹ Intended Nationally Determined Contribution — Submission of the Republic of Kazakhstan. Paris, 2015

² Руководство по оценке выбросов из неточечных источников. Серия материалов ЮНИТАР по технической поддержке РВПЗ. Женева, 1998. № 3. 71 с.

будет наиболее эффективным. Выбросы из рассеянных источников могут составлять значительную долю в общем количестве выбросов ЗВ, особенно на местном уровне.

Для оценки структуры выбросов ПГ города и пространственного распределения источников ПГ важны следующие типы рассеянных источников:

- источники в сфере энергетики;
- использование сжиженного газа в бытовых целях;
- использование автотранспорта.

Учёт выбросов ПГ в крупных городах затрудняет также тот факт, что объекты-потребители вырабатываемой энергии часто располагаются на определённом удалении от объектов энергетики, которые являются непосредственными источниками выбросов. Например, в г. Нур-Султан, территориально расположенном в пределах Акмолинской обл., около 10 % электроэнергии импортируется с Экибастузской ГРЭС, расположенной в соседней Павлодарской обл. В некоторых городах, таких как Павлодар и Экибастуз, импорт и экспорт энергии могут достигать больших величин. Кроме того, в ряде случаев имеет место даже межгосударственная передача энергии. Всё это приводит к вероятности двойного учёта выбросов парниковых газов и, соответственно, чрезмерно высокой эффективности мер по их сокращению, которые при использовании неверных методов могут быть приписаны одновременно потребителю и производителю. В расчётах выбросов парниковых газов критически важен выбор такого способа пространственной привязки выбросов (или вкладов в выбросы), позволяющего избежать двойного учёта, не снижая детальности исследования настолько существенно, чтобы это не позволило бы планировать меры климатической политики.

В каждой из трёх разработанных и описанных в данной работе моделей осуществлена оценка вклада конечных потребителей энергии и ресурсов в выбросы г. Нур-Султан. Пространственная привязка вкладов в выбросы осуществляется по планировочным секторам, выделенным ТОО «НИПИ Астанагенплан»¹. Под планировочным сектором понимается район города, ограниченный элементами улично-дорожной сети, имеющий определённое функциональное назначение и содержащий относительно однородную застройку. В качестве альтернатив использования планировочных секторов возможно осуществлять поквартальный расчёт выбросов ПГ.

Далее описаны методы расчёта выбросов, соответствующие каждому из трёх уровней детальности.

Уровень детальности расчётов 1 основан на использовании расчётного количества выбросов ПГ города в целом для предсказания величин выбросов планировочных секторов. В западных источниках такой подход принято называть *Downscaling*. При использовании данного подхода суммарная величина выбросов города распределяется по планировочным секторам пропорционально факторам, увеличивающим потребление энергии. Преимуществами моделей, построенных на применении данного подхода, является наличие открытых источников необходимых исходных данных, а также отсутствие погрешности в суммарном количестве выбросов. Однако у метода имеются и существенные недостатки. Так, выбросы некоторых групп рассеянных источников или параметры для их расчёта могут быть не учтены или не полностью учтены в агрегированных статистических данных (например, выбросы от районов частной застройки, не подключённых к системе централизованного энергоснабжения, выбросы автомобильного транспорта не учитываются при формировании статистических данных). Также возможны существенные ошибки в распределении агрегированных показателей в случае неверного подбора параметров, описывающих потребление энергии районами города. Очевидно, что в разрезе отдельных районов города уровень детальности расчётов

¹ Пирожков А.В., Жунусов С.Е., Тайталиев Б.Х. Общая пояснительная записка. Внесение изменений и дополнений в генеральный план города Астаны. Астана: ТОО «НИПИ Астанагенплан», 2015. 233 с.

1 может приводить к достаточно большим погрешностям, однако для исследования динамики выбросов ПГ муниципалитетов, не обеспеченных детальными исходными данными, его применение может быть единственным возможным вариантом.

Использованные исходные данные для г. Нур-Султан:

1. Количество сожжённого топлива (уголь, газ, бензин, дизельное топливо, сжиженный газ, используемый для заправки автомобилей) по данным, опубликованным в статистическом сборнике «Топливо-энергетический баланс города Нур-Султан»¹. Информация о выбросах ПГ в городе Нур-Султан не предоставляется Комитетом по статистике Республики Казахстан, однако с использованием методики, разработанной ИРСС и утверждённой в Республике Казахстан², возможно осуществить расчёт выбросов, исходя из количества сожжённого топлива.

2. Информация о площади многоквартирной и индивидуальной жилой застройки в разрезе планировочных секторов получена по данным геопортала «Open Street Maps». Используется в качестве фактора, обуславливающего величину выбросов ПГ от коммунального сектора в разрезе планировочных секторов.

3. Информация о протяжённости улично-дорожной сети в разрезе планировочных секторов получена по данным геопортала «Open Street Maps». Используется в качестве фактора, обуславливающего величину выбросов ПГ от транспортного сектора в разрезе планировочных секторов.

Ход расчёта:

1. Расчёт суммарных выбросов ПГ от выработки электрической и тепловой энергии на ТЭЦ; сжигания газа на бытовые нужды; использования автомобильного транспорта по Методическим указаниям по расчёту выбросов парниковых газов от тепловых электростанций и котельных и Методическим указаниям по расчёту выбросов парниковых газов от предприятий автотранспорта³.

2. Распределение суммарных величин выбросов ПГ по планировочным секторам с использованием формулы:

$$M_{\text{план.сек.}} = S_1/S_{1 \text{ общ}} (M_{1 \text{ общ}} + M_{2 \text{ общ}}) + S_2/S_{2 \text{ общ}} M_{3 \text{ общ}} + L_1/L_{1 \text{ общ}} (M_{4 \text{ общ}} + M_{5 \text{ общ}} + M_{6 \text{ общ}}),$$

где

- $M_{\text{план.сек.}}$ — выбросы парниковых газов планировочного сектора (т);
- $M_{1 \text{ общ}} - M_{6 \text{ общ}}$ — соответственно: общегородские выбросы от сжигания угля на ТЭЦ; выбросы от сжигания газа на бытовые нужды; выбросы от сжигания угля в автономных системах отопления; выбросы от сжигания бензина при использовании транспорта; выбросы от сжигания дизельного топлива при использовании транспорта; выбросы от сжигания газобаллонного топлива при использовании транспорта (т);
- S_1 — площадь жилой застройки, имеющей доступ к централизованной системе тепло-энергоснабжения в пределах планировочного сектора (m^2);
- $S_{1 \text{ общ}}$ — общая площадь жилой застройки, имеющей доступ к централизованной системе тепло- энергоснабжения в городе (m^2);

¹ Топливо-энергетический баланс г. Нур-Султана. 2018 год. Статистический сборник. Сер. 5. Статистика энергетики и товарных рынков — Нур-Султан: Комитет по статистике Министерства экономики Республики Казахстан, 2019. 15 с.

² Методические указания по расчёту выбросов парниковых газов от тепловых электростанций и котельных. РНД. Астана, 2010. 14 с.

³ Методические указания по расчёту выбросов парниковых газов от предприятий автотранспорта. РНД. Астана, 2010. 22 с.

- S_2 — площадь жилой застройки, не имеющей доступ к централизованной системе тепло-энергоснабжения в пределах планировочного сектора (m^2);
- $S_{2 \text{ общ}}$ — общая площадь жилой застройки, не имеющей доступ к централизованной системе тепло-энергоснабжения в городе (m^2).

Уровень детальности расчётов 2 основан на использовании нормативных удельных значений энерго- или топливо-потребления (например, средние затраты электроэнергии на человека, среднее теплотребление различными типами зданий; средние пробеговые выбросы автомобилей и др.). Как правило, такие нормативные значения закрепляются в нормативно-правовых актах администрации города. Преимуществами такого подхода следует считать возможность учёта большинства типов источников ПГ при наличии соответствующих нормативных удельных значений. Также расчётные объёмы выбросов по отдельным районам невелики и могут быть легко выявлены. Однако суммарная накопленная ошибка может быть существенной.

Использованные исходные данные для г. Нур-Султан:

1. Информация о площади жилой застройки, имеющей доступ к централизованной системе теплоснабжения в разрезе планировочных секторов в разбивке по классам этажности: до 5 этажей; 6–7 этажей; 8–9 этажей; 10–11 этажей; 12–25 этажей по данным ТОО «НИПИ Астанагенплан».
2. Информация о площади жилой застройки, не имеющей доступ к централизованной системе теплоснабжения в разрезе планировочных секторов по данным ТОО «НИПИ Астанагенплан».
3. Информация о суммарной численности населения города¹.
4. Нормативы теплопотери в разрезе классов этажности (табл. 1)².

Табл. 1. Теплопотери жилых зданий
Table 1. Heat loss of residential buildings

Этажность	Вт ч/ ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ сут)
до 5	23
от 6 до 7	22
от 8 до 9	21
от 10 до 11	20
от 12 и выше	12
Индивидуальные жилые строения	33,3333

5. Градусо-сутки отопительного периода (6686,5 $^\circ\text{C}$ сут.).
6. Норматив энергопотребления (140 кВт ч/ (чел мес.).
7. Норматив потребления газа на бытовые нужды (15 m^3 / чел мес.).
8. Информация о средней скорости дорожного движения в разрезе улиц города по данным геопортала «Яндекс. Пробки».
9. Норматив среднего расхода топлива легкового автомобиля.

Ход расчёта:

1. Определение потребления тепловой энергии планировочным сектором по формуле:

¹ Айдапкелов Н.С. Демографический ежегодник Казахстана. 2014–2018. Нур-Султан: Комитет по статистике Министерства экономики Республики Казахстан, 2019. 281 с.

² Тепловая защита зданий. Строительные нормы Республики Казахстан. СН РК 2.04.-04-2011. Алматы: РГП «КазНИИССА», 2011. 50 с.

$$E_{1 \text{ план.сек}} = S_{\text{ижс}} T_{\text{ижс}} t_{\text{оп}} + \sum_{i=1}^n (S_i T_i t_{\text{оп}}), \text{ где}$$

- $E_{1 \text{ план.сек}}$ — потребление тепловой энергии планировочным сектором (Вт·час/год);
 - $S_{\text{ижс}}$ — площадь индивидуальных жилых строений, не имеющих доступа к централизованной системе отопления (м^2);
 - $T_{\text{ижс}}$ — удельные теплотери, характерные для индивидуальных жилых строений, не имеющих доступа к централизованной системе отопления ($\text{Вт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{сут})$);
 - $t_{\text{оп}}$ — градусо-сутки отопительного периода ($^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$);
 - S_i — площадь i -того класса этажности жилых зданий (м^2);
 - T_i — удельные теплотери, характерные для i -того класса этажности жилых зданий (м^2);
 - n — количество классов этажности жилых зданий.
2. Определение потребления электроэнергии планировочным сектором по формуле:

$$E_{2 \text{ план.сек}} = (S_{\text{ижс}} + S_{\text{центр}}) / S_{\text{общ}} P U, \text{ где}$$

- $E_{2 \text{ план.сек}}$ — потребление электрической энергии планировочным сектором (Вт·час/год);
 - $S_{\text{центр}}$ — суммарная площадь жилых строений всех классов этажности (м^2);
 - $S_{\text{общ}}$ — общая площадь жилой застройки города (м^2);
 - P — численность населения города (чел.);
 - U — норматив потребления электроэнергии (В/чел).
3. Определение потребления газа на бытовые нужды по формуле:

$$E_{3 \text{ план.сек}} = (S_{\text{ижс}} + S_{\text{центр}}) / S_{\text{общ}} P G, \text{ где}$$

- $E_{3 \text{ план.сек}}$ — потребление газа на бытовые нужды;
- G — норматив потребления газа ($\text{м}^3/\text{чел}$).

4. Определение количества топлива, необходимое для выработки тепловой и электрической энергии, исходя из норматива в 0,34 кг угля на выработку 1 кВт ч на ТЭЦ и среднего значения в 0,25 кг угля на выработку 1 кВт ч тепловой энергии в автономных системах отопления.

5. Определение интенсивности дорожного движения по формуле:

$$I = 1000 v_{\text{ср}} N / (d + v_{\text{ср}}/2), \text{ где}$$

- I — интенсивность автомобильного движения (авт./час);
- $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость автомобильного движения (км/ч);
- N — количество полос дорожного движения;
- d — средняя длина одного автомобиля (м);
- $v_{\text{ср}}/2$ — среднее расстояние между движущимися автомобилями, которое принимается за минимальное безопасное расстояние, равное половине модуля скорости дорожного движения, выраженного в метрах, согласно правилам дорожного движения Республики Казахстан (м).

6. Определение суммарного расхода топлива автомобилями, проезжающими через улицу по формуле:

$$m_{\text{авто}} = L \cdot I \cdot 8760 \cdot 0,11, \quad \text{где}$$

- $m_{\text{авто}}$ — суммарный расход топлива автомобилями, проезжающими через улицу (л);
- L — длина сегмента улицы (км);
- 8760 — переводной коэффициент из часовой в годовую интенсивность;
- 0,11 — норматив среднего расхода (л/км).

7. Расчёт выбросов ПГ от стационарных и передвижных источников в пределах планировочных секторов, исходя из количества сожжённого топлива (определено на шагах 3, 4 и 6) по Методическим указаниям по расчёту выбросов парниковых газов от тепловых электростанций и котельных и Методическим указаниям по расчёту выбросов парниковых газов от предприятий автотранспорта.

Уровень детальности 3 предполагает расчёт выбросов аналогичным уровнем вторым способом, однако с использованием фактических данных об энерго- и топливно-потреблении вместо нормативных значений. В городах такие данные могут быть получены методами социологических исследований, исследовании счетов на оплату коммунальных услуг или натурными замерами. Подробное описание алгоритма расчёта описано в публикации [Дехнич, 2015]. Также использования уровня детальности 3 предполагает учёт энергопотерь в сетях в ходе доставки энергии от места выработки к конечному потребителю. В данной работе величина энергопотерь распределена между планировочными секторами пропорционально их удалённости от мест выработки энергии.

Использованные исходные данные для г. Нур-Султан:

1. Информация о площади жилой застройки, имеющей доступ к централизованной системе теплоснабжения в разрезе планировочных секторов в разбивке по классификационным группам, выделяемым по технологии и материалу постройки. Расчёты выполнены для 11 классификационных групп строений [Дехнич, 2015].

2. Значения удельных теплопотерь (Вт/м² год) для каждой из указанных выше классификационной группы строений. Получены по результатам исследования счетов на оплату коммунальных услуг.

3. Значения удельного потребления электроэнергии (Вт/чел год) и газа (м³/чел год) на бытовые нужды. Получены по результатам исследования счетов на оплату коммунальных услуг.

4. Информация о средней скорости дорожного движения в разрезе улиц города по данным геопортала «Яндекс. Пробки».

5. Значения расхода топлива (в разбивке по видам) в зависимости от скорости дорожного движения.

6. Величина энергопотерь, согласно статистическому сборнику «Топливо-энергетический баланс г. Нур-Султана. 2018 г.».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольшая расчётная величина выбросов ПГ города (рис. 1) соответствует уровню детальности 2, который предполагает использование нормативных значений энерго- и топливно-потребления. Общий объём выбросов, рассчитанный с использованием уровня детальности 2 на 7 % больше результатов расчёта с использованием уровня 1. При этом в разрезе типов источников эта разница неодинакова. Выбросы коммунального сектора превышают расчётное значение уровня 1 на 25 %, что может быть связано с завышенными значениями нормативов энергопотребления, и, главным образом, теплопотребления в районах многоквартирной застройки. Это также подтверждает тот факт, что большинству районов с преобладанием многоквартирных зданий, в особенности средней этажностью до 5 этажей, соответствует максимальное превышение расчётных

объёмов выбросов уровня детальности 2 над уровнем детальности 1. Минимальные расхождения расчётных значений выбросов между первым и вторым уровнем детальности (рис. 5) соответствуют районам с преобладанием частной застройки.

Суммарные расчётные выбросы транспортного сектора при использовании уровня детальности 2 на 40 % ниже аналогичного значения, полученного с использованием уровня 1. Это может быть связано с отсутствием учёта выбросов, связанных с прогревом двигателя автомобиля, влияния средней скорости дорожного движения на расход топлива, а также отсутствием достоверных нормативов пробеговых выбросов тяжёлой автомобильной техники.

Суммарные расчётные выбросы парниковых газов при использовании уровня детальности 3 составляют 7,7 млн т / год, что на 10 % ниже, чем при использовании уровня 1. При этом разница в коммунальном секторе составляет около 6,5 %, а в транспортном — 16 %.

Как и в случае уровня 2, расхождение в выбросах транспортного сектора, вероятно, связано с отсутствием учёта выбросов от прогрева двигателя автомобиля и отсутствием достоверной информации о расходе топлива тяжёлой автомобильной техники. Однако влияние средней скорости дорожного движения на расход топлива в уровне детальности 3 был учтён, что обусловило меньшее расхождение суммарных выбросов от использования автомобильного транспорта.

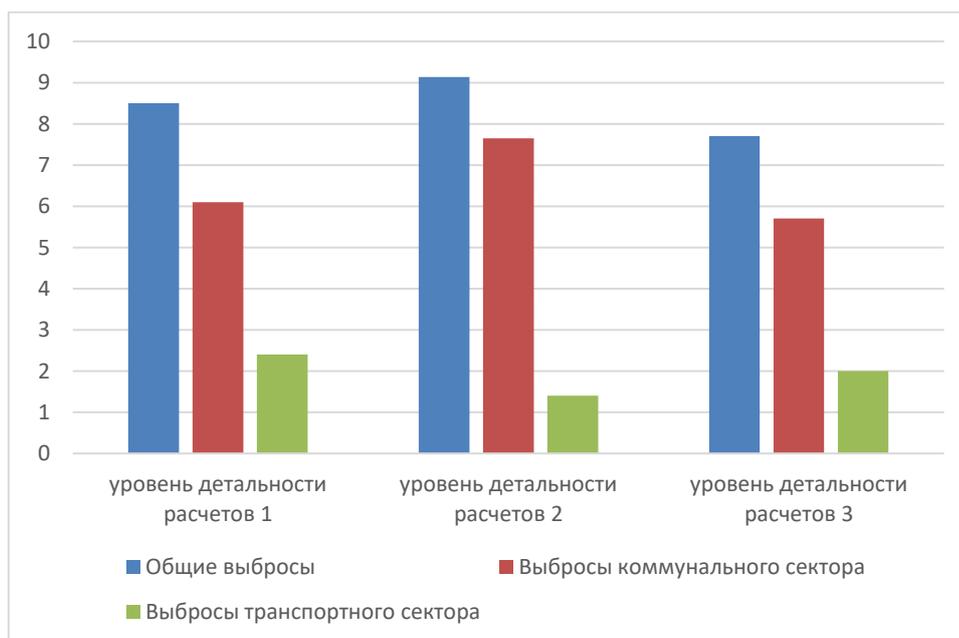


Рис. 1. Суммарные выбросы парниковых газов г. Нур-Султан по результатам расчётов различных уровней детальности (млн т)
Fig. 1. Total amount of greenhouse gas emissions of Nur-Sultan City according different accuracy levels (mln t)

Минимальное расхождение в расчётах выбросов между уровнем 3 и уровнем 1 соответствует районам частной застройки, а также районам новой застройки на правом берегу г. Нур-Султан со средней этажностью 5–10 этажей, выполненной из кирпича. Более высокие выбросы относительно уровня 1 характерны для районов, в пределах которых распространены панельные жилые здания в 5–9 этажей. Значения выбросов, низкие относительно уровня 1, характерны для некоторых районов частной застройки, отличающейся относительно высокой средней этажностью (более 2 этажей),

площадью жилых зданий, а также для планировочных секторов в северной части города, где основным источником выбросов является транспорт.

Рассматривая территориальную дифференциацию расчётных выбросов ПГ (рис. 2–4), можно выявить следующие закономерности:

- максимальные выбросы для уровня детальности 1 приурочены к центральным районам правобережья г. Нур-Султан, отличающимся крайне высокой плотностью многоэтажной застройки, а также высокой плотностью улично-дорожной сети. За пределами района с максимальными объёмами выбросов ПГ их распределение достаточно равномерно с локальными максимумами в развивающихся районах нового центра левобережья и районах к югу от канала Ак-Булак, для которых характерна средняя плотность высокоэтажной застройки и наличие среднеэтажной (5–9 этажей) застройки;

- пространственное распределение выбросов для уровня 2, в целом схоже с уровнем 1. Отличием является большая выраженность максимумов объёма выбросов в пределах микрорайона «Юго-Восток», застроенного зданиями с автономными системами отопления, для которых характерен достаточно высокий норматив теплопотерь;

- пространственное распределение выбросов для уровня детальности 3 отличается достаточно низкими, в сравнении с уровнем 1, значениями выбросов ПГ в районах старого центра города, застроенного высокоэтажными зданиями, которые, однако, характеризуются достаточно низкими значениями теплопотерь, а также отсутствием крайне высоких значений выбросов ПГ в районах частной застройки в юго-восточной части города, что может быть объяснено низкой плотностью населения этого района (по данным ТОО «НИПИ Астанагенплан», отношение численности проживающих к площади застройки в этом районе существенно ниже, чем в других районах частной застройки), а также значениями теплопотребления ниже тех, что закреплены в нормативах.

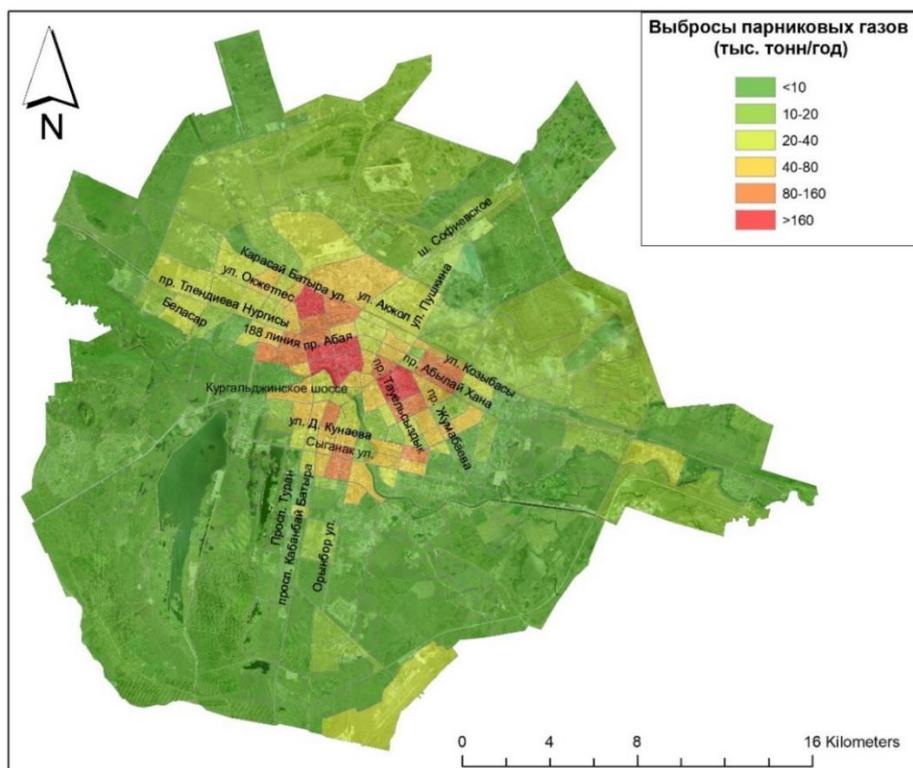


Рис. 2. Выбросы парниковых газов, по результатам расчёта уровня детальности 1
 Fig. 2. Greenhouse gas emission according 1st accuracy level

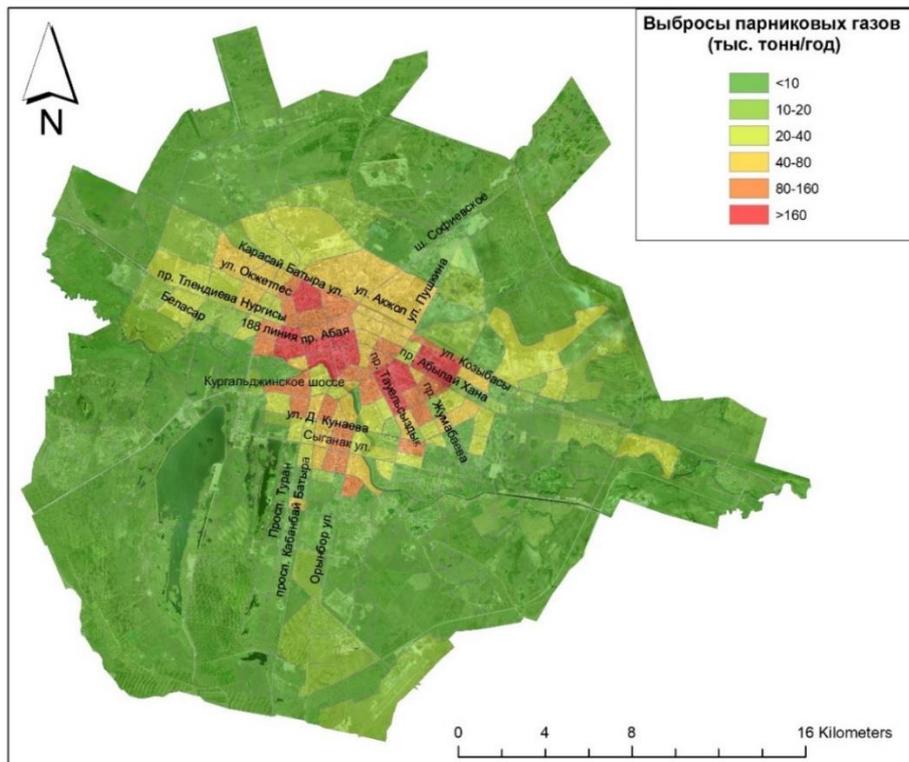


Рис. 3 Выбросы парниковых газов, по результатам расчёта уровня детальности 2
Fig. 3. Greenhouse gas emission according 2nd accuracy level

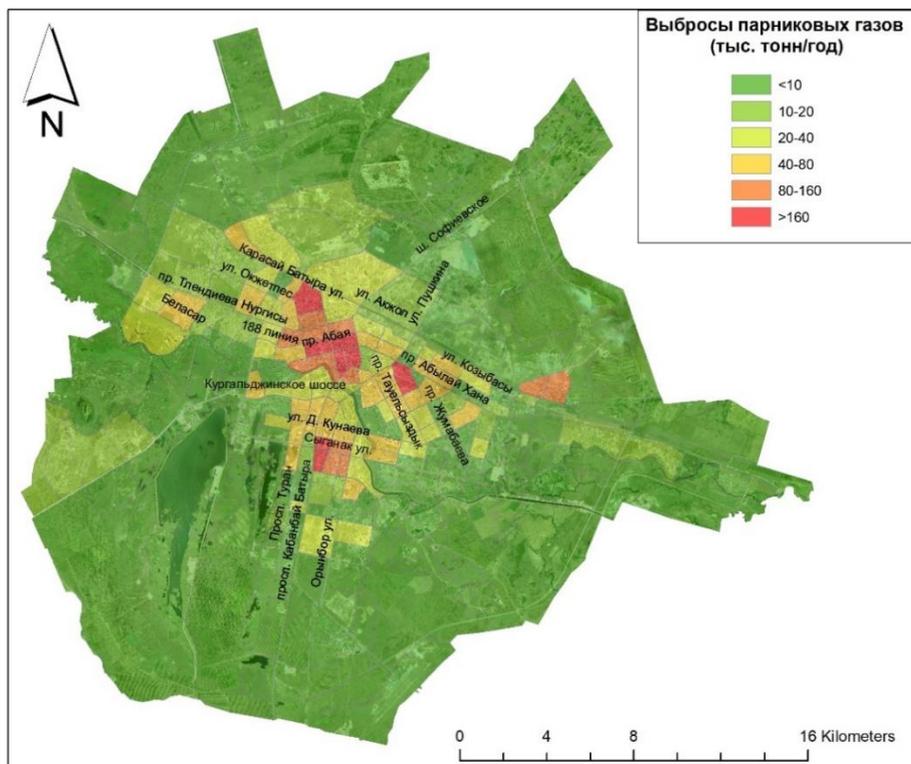


Рис. 4 Выбросы парниковых газов, по результатам расчёта уровня детальности 3
Fig. 4. Greenhouse gas emission according 3rd accuracy level

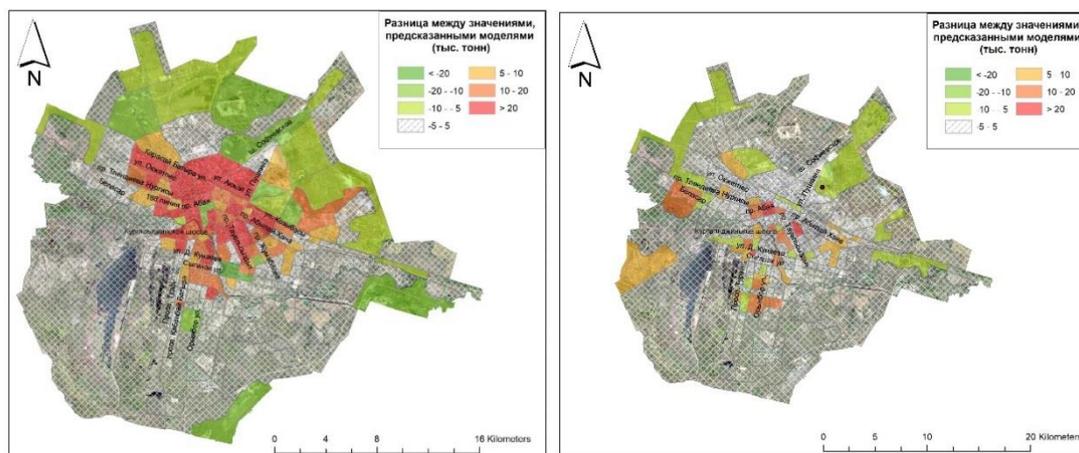


Рис. 5 Расхождение в результатах расчётов между уровнями детальности 2 и 1 (слева) и уровнями детальности 3 и 1 (справа)

Fig. 5. Difference between 2nd and 1st (on the left); 3rd and 1st (on the right) accuracy level of greenhouse gas calculations

ВЫВОДЫ

Главным фактором, обуславливающим территориальную дифференциацию выбросов ПГ, являются теплопотери зданий, связанные с технологией и материалом, использованным для постройки.

Нормативы теплопотерь, закреплённые в нормативных документах, учитывают этажность здания, но не учитывают материал, из которого построено здание. Как следствие, при использовании нормативных значений в расчёте выбросов ПГ, как это предполагается уровнем детальности 2, следует ожидать завышенных (до 25 % на примере г. Нур-Султан) значений выбросов ПГ от источников коммунального сектора, особенно в районах с высокой плотностью современной многоэтажной высотной застройки, обеспеченной централизованной системой теплоснабжения.

Использование в расчёте выбросов ПГ фактических значений энергопотребления, полученных натурными методами или с применением исследования счетов на оплату коммунальных услуг, как это предполагается уровнем детальности 3, сопряжено с меньшими погрешностями (около 10 % на примере г. Нур-Султан), чем при использовании нормативных значений. Однако в этом случае следует ожидать занижения значений выбросов, так как такой подход недостаточно полно учитывает потери энергии при транспортировке.

Значительным фактором величины выбросов ПГ от использования автомобильного транспорта является зависимость расхода топлива от средней скорости дорожного движения. Этот фактор не учитывается при использовании нормативных значений расхода топлива. И, как следствие, при выполнении расчётов на уровне детальности 2 следует ожидать завышенных значений выбросов ПГ на скоростных автомагистралях с относительно низкой интенсивностью (присутствуют на периферии г. Нур-Султан) и заниженных значений выбросов на центральных улицах города с низкой скоростью дорожного движения. Уровень детальности расчёта 3 лишён таких недостатков.

Из-за отсутствия учёта влияния выбросов, связанных с прогревом двигателя автомобиля, а также отсутствием достоверных данных о расходе топлива тяжёлой автомобильной техникой уровни детальности 2 и 3 характеризуются заниженными значениями выбросов ПГ от использования автомобильного транспорта. Наблюдается расхождение в 41 % для уровня 2 и 16 % для уровня 3 на примере г. Нур-Султан.

Метод Downscaling, лежащий в основе уровня детальности 1, может быть использован в малых и средних городах с относительно однородной застройкой и небольшими различиями в интенсивности транспортных потоков, для которых наблюдается отсутствие необходимых для более детального исследования исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дехнич В.С. Расчёт выбросов парниковых газов от использования автомобильного транспорта города Астаны. Аспирант, 2015. № 10. С. 68–74.
2. Дехнич В.С., Дронин Н.М. Оценка перспектив сокращения выбросов парниковых газов на урбанизированных территориях Республики Казахстан (на примере города Астаны). Мир геоэкологии. Геоэкологические проблемы и пути их решения. М.: Варсон, 2017. С. 95–103.
3. Abdullah L., Pauzi H.M. Methods in forecasting carbon dioxide emissions: a decade review. Jurnal Teknologi, 2015. No 1. P. 67–82.
4. Ahmad I.H. Climate policy integration: towards operationalization Imran Habib Ahmad. DESA Working Paper, 2009. No 73. P. 2–18.
5. Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. 151 p.
6. Choi J., Roberts D.C., Lee E. Forecast of CO² emissions from the U.S. transportation sector: estimation from a double exponential smoothing model. Journal of the Transportation Research Forum, 2014. No 3. P. 63–81.
7. Gurney K.R., Razlivanov I., Song Y., Zhou Y., Benes B., Abdul-Massih M. Quantification of fossil fuel CO² at the building/street scale for a large US city. Environmental Science and Technology, 2012. No 46. P. 12194–12202.
8. Gurney K.R. A new methodology for quantifying residential and commercial fossil fuel CO² emissions at the building spatial scale and hourly time scale. Carbon Management, 2012. No 1, P. 45–56.
9. Henderson J., Hart O. BREDEM 2012 — A technical description of BRE domestic energy model. Garston: BRE, 2013. 37 p.
10. Ramaswami A., Chavez A., Ewing-Thiel J., Reeve K. Two approaches to greenhouse gas emissions foot-printing at the city scale. Environmental Science and Technology, 2011. No 3. P. 4205–4206.
11. Schipper L., Fabian H., Leather J. Transport and carbon dioxide emissions: forecasts, options analysis, and evaluation. Asian Development Bank Sustainable Development Working Paper Series, 2009. No 9. P. 1–62.

REFERENCES

1. Abdullah L., Pauzi H.M. Methods in forecasting carbon dioxide emissions: a decade review. Jurnal Teknologi, 2015. No 1. P. 67–82.
2. Ahmad I.H. Climate policy integration: towards operationalization Imran Habib Ahmad. DESA Working Paper, 2009. No 73. P. 2–18.
3. Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. 151 p.
4. Choi J., Roberts D.C., Lee E. Forecast of CO² emissions from the U.S. transportation sector: estimation from a double exponential smoothing model. Journal of the Transportation Research Forum, 2014. No 3. P. 63–81.

5. *Dekhnich V.S.* Calculation of greenhouse gas emissions from the use of road transport in Astana city. Aspirant, 2015. No 10. P. 68–74 (in Russian).
 6. *Dekhnich V.S., Dronin N.M.* Assessment of the prospects for reducing greenhouse gas emissions in the urbanized territories of the Republic of Kazakhstan (using the example of the city of Astana) World of Geoecology. Geoecological Problems and Solutions. Moscow: Warson, 2017. P. 95–103 (in Russian).
 7. *Gurney K.R., Razlivanov I., Song Y., Zhou Y., Benes B., Abdul-Massih M.* Quantification of fossil fuel CO² at the building/street scale for a large US city. Environmental Science and Technology, 2012. No 46. P. 12194–12202.
 8. *Gurney K.R.* A New methodology for quantifying residential and commercial fossil fuel CO² emissions at the building spatial scale and hourly time scale. Carbon Management, 2012. No 1, P. 45–56.
 9. *Henderson J., Hart O.* BREDEM 2012 — A technical description of BRE domestic energy model. Garston: BRE, 2013. 37 p.
 10. *Ramaswami A., Chavez A., Ewing-Thiel J., Reeve K.* Two approaches to greenhouse gas emissions foot-printing at the city scale. Environmental Science and Technology, 2011. No 3. P. 4205–4206.
 11. *Schipper L., Fabian H., Leather J.* Transport and carbon dioxide emissions: forecasts, options analysis, and evaluation. Asian Development Bank Sustainable Development Working Paper Series, 2009. No 9. P. 1–62.
-