

А.В. Чердниченко<sup>1</sup> , В.С. Чердниченко<sup>2,\*</sup> , В.С. Комлева<sup>2</sup> ,

А.Е. Нуртулеуова<sup>2</sup> , Н.М. Кулмуханова<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Университет «Туран», Казахстан, г. Алматы

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

\*e-mail: vladimir.cherednichenko@kaznu.kz

## МЕТАН В КАЗАХСТАНЕ: ИСТОЧНИКИ И ДИНАМИКА

Рассмотрены естественные и антропогенные источники метана в Республике Казахстан. Основными антропогенными источниками являются районы угледобычи, и нефтегазодобычи. Угледобыча сосредоточена в центральных районах Республики, а нефтегазодобыча - в западных районах. Показано, что в результате заметного сокращения подземной угледобычи выбросы метана заметно сократились. Довольно устойчивыми источниками метана остаются места нефти и газодобычи. Отмечается увеличение доли эмиссий от транспортировки углеводородного топлива, существенная динамика отмечается у морских перевозок, как одним из самых динамично растущих источников.

Целью данного исследования являлось изучить основные источники выбросов на территории Казахстана, оценить объёмы выбрасываемого метана, оценить его динамику за последние десятилетия и сделать некоторые прогностические оценки этой динамики.

Использованы материалы инвентаризации за тридцатилетний период и данные спутников, осуществляющих регулярное зондирование загрязняющих веществ в атмосфере. Спутник, успешно измеряющий с помощью современного лидара концентрации основных примесей в атмосфере, облачность и пр., имеющий разрешающую способность по горизонтали 333 м.

Анализируя спутниковые данные, удалось обнаружить и другие источники метана. На пространственное распределение метана оказывает заметное влияние трансграничный перенос.

**Ключевые слова:** инвентаризация выбросов, спутниковые данные, эмиссии метана.

A.V. Cherednichenko<sup>1</sup>, V.S. Cherednichenko<sup>2</sup>, V.S. Komleva<sup>2</sup>,  
A.E. Nurtuleuova<sup>2</sup>, N.M. Kulmukhanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Turan University, Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

\*e-mail: vladimir.cherednichenko@kaznu.kz

### Methane in Kazakhstan: sources and dynamics

Natural and anthropogenic sources of methane in the Republic are considered. The main anthropogenic sources are coal mining and oil and gas production areas. Coal mining is concentrated in the central regions of the republic, and oil and gas production is concentrated in the western regions. It is shown that as a result of a noticeable reduction in underground coal mining, methane emissions have significantly decreased. Oil and gas production sites remain fairly stable sources of methane. There is an increase in the share of emissions from the transportation of hydrocarbon fuels; significant dynamics are observed in maritime transportation, as one of the most dynamically growing sources.

The purpose of this study was to study the main sources of emissions on the territory of Kazakhstan, to estimate the volume of methane emitted, to assess its dynamics over the past decades and to make some prognostic estimates of this dynamics.

The materials of the inventory for a thirty-year period and data from satellites carrying out regular sounding of pollutants in the atmosphere were used. A satellite that successfully measures concentrations of major impurities in the atmosphere, clouds, etc. with the help of a modern lidar, having a horizontal resolution of 333 m.

Analyzing satellite data, it was possible to detect other sources of methane besides. The spatial distribution of methane is significantly affected by transboundary transport.

**Key words:** inventory of emissions, satellite data, methane emissions.

А.В. Чередниченко<sup>1</sup>, В.С. Чередниченко<sup>2</sup>, В.С. Комлева<sup>2</sup>,  
А.Е. Нуртулеуова<sup>2</sup>, Н.М. Күлмуханова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> «Тұран» университеті, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>2</sup> Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

\*e-mail: vladimir.cherednichenko@kaznu.kz

### Қазақстандағы метан: көздері және динамикасы

Республикадағы метанның табиғи және антропогендік көздері қарастырылды. Негізгі антропогендік көздер – көмір өндіру және мұнай-газ өндіру аудандары. Көмір өндіру республиканың орталық аудандарында, ал мұнай – газ өндіру батыс аудандарда шоғырланған. Жер асты көмір өндірісінің айтарлықтай төмендеуі нәтижесінде метан шығарындылары айтарлықтай төмендегені көрсетілген. Мұнай және газ өндіру орындары метанның жеткілікті тұрақты көздері болып қала береді. Көмірсутекті отынды тасымалдау кезінде шығарындылар үлесінің артуы байқалады, ең серпінді дамып келе жатқан көздердің бірі ретінде теңіз көлігінде айтарлықтай динамика байқалады.

Бұл зерттеудің мақсаты – Қазақстан аумағындағы шығарындылардың негізгі көздерін зерттеу, шығарылатын метанның көлемін бағалау, оның соңғы онжылдықтардағы динамикасын бағалау және осы динамикаға кейбір болжамдық баға беру.

Отыз жылдық кезеңдегі түгендеу материалдары және атмосферадағы ластаушы заттарды жүйелі зондтауды жүзеге асыратын спутниктік деректері пайдаланылды. Заманауи лидар көмегімен атмосферадағы негізгі қоспалардың концентрациясын, бұлттылықты және т.б., көлденең ажыратымдылығы 333 м болатын сәтті өлшейтін спутник.

Спутниктік деректерді талдай отырып, метанның басқа көздерін анықталды. Метанның кеңістіктік таралуына трансшекаралық тасымалдау айтарлықтай әсер етеді.

**Түйін сөздер:** шығарындыларды түгендеу, спутниктік деректер, метан эмиссиялары.

### Введение

Метан является важным парниковым газом. Согласно (Руководство, 2006; Zavala-Araiza et al., 2021 и др.) при оценке национальных выбросов парниковых газов его антропогенные выбросы рассчитываются от большого количества источников, с большой аккуратностью. В отличие от углекислого газа метан относят к короткоживущим парниковым газам. Поскольку установлено, что, несмотря на небольшую продолжительность жизни, около 12 лет, его потенциал нагревания в 27.9 раза выше, чем углекислого газа (Гинзбург и др., 2008; Роль метана 2018; Kirschke et al., 2015; Mar et al., 2022; Shindel et al., 2017; Shine et al., 2007; Smith et al., 2021; и др.) Авторы (Boucher et al., 2009; Fang et al., 2013; GMI, 2015) считают, что именно CH<sub>4</sub> ответственен за 20 % глобального повышения температуры за период с начала промышленной революции (с 1750 г.). другие авторы (European Commission, 2020 и др.) считают, что метан ответственен за 30 % глобального потепления. Метан имеет довольно устойчивые пространственно-временные характеристики своего распределения в атмосфере, и стоки.

Около 88 % метана содержится в тропосфере, и он здесь окисляется, около 7 % содержится и окисляется в стратосфере и остальные 5 %

окисляются на поверхности почвы (Boucher et al., 2009; Kirschke et al., 2015; Saunio et al., 2016; Shindel et al., 2017; и др.). Тропосферный метан, окисляясь, способствует образованию тропосферного озона-вещества первой категории опасности для здоровья человека, приводящего к высокой смертности. Согласно ряду исследований до 35 % приземного озона образуются именно в результате окисления метана (Turner et al., 2016; Van Dingenen et al., 2018; и др.). Метан также отрицательно воздействует на растительность. По некоторым данным (Fanelli, 2007; Jackson et al., 2020) ежегодный ущерб от этого составляет 11 – 18 млрд. долларов. В то же время сама растительность является производителем некоторого количества метана (Keppler et al., 2006). Имеется ряд других отрицательных проявлений воздействия CH<sub>4</sub>. Мировое сообщество хотя и не включило ещё CH<sub>4</sub> опасные вещества, принимает меры к уменьшению его антропогенных выбросов. Прежде всего он строго учитывается, как парниковый газ в бюджете выбросов государств (Руководящие принципы, 2006; CLRTP, 2018; Unger 2021). В последние годы ряд стран, в первую очередь Европейское сообщество, принимает меры или намерены их принять в ближайшие годы к уменьшению выбросов CH<sub>4</sub>, как вещества, способствующего образованию озона и прямому отрицательному влиянию на ряд про-

цессов (European Commission, 2020; GMI, 2015; Höglund-Isaksson, 2020; Unger 2021). Ряд авторов считает, что влияние CH<sub>4</sub> на образование озона и прямое отрицательное воздействие на окружающую среду более важно для сообщества, чем его парниковое воздействие (Fanelli, 2007; Jackson, 2020; Vandyck, et al., 2020; и др.).

Целью данного исследования являлось изучить основные источники выбросов на территории Казахстана, оценить объёмы выбрасываемого метана, оценить его динамику за последние десятилетия и сделать некоторые прогностические оценки этой динамики.

### Материалы и методы

Работа выполнена на основе официальных материалов инвентаризации парниковых газов в Республике Казахстан, раздел «Летучие вещества» (исполнитель раздела Чередниченко А.В.) Инвентаризация выполнялась в строгом соответствии с Руководящими принципами межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (Руководящие принципы, 2006). Материалы инвентаризации за весь период её ведения, т.е. более чем тридцатилетний период. Кроме того, использованы данные спутников, осуществляющих регулярное зондирование загрязняющих веществ в атмосфере.

Спутник CALIPSO, спутник США, работающий с 2004 г. и успешно измеряющий с помощью современного лидара концентрации основных примесей в атмосфере, облачность и пр., имеющих разрешающую способность по горизонтали 333 м. Информацией этого спутника большей частью мы и пользовались. Характеристики этого спутника можно найти в (Winker et al., 2004; Winker et al., 2007; Winker et al., 2009). Следующий спутник, информацией которого мы пользовались, Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) — космический спутник, запущенный в 2017 году Европейским космическим агентством (ESA) с целью ежедневного глобального наблюдения за химическим составом атмосферы Земли, содержанием и распространением в ней основных загрязнителей и парниковых газов. Основная полезная нагрузка спутника — сенсор TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), выполняющий сбор данных в ультрафиолетовом (UV), видимом (VIS), ближнем (NIR) и среднем инфракрасном диапазонах (SWIR). Пространственное разрешение сенсора варьируется от 1,8 до 28 км, но для большинства каналов составляет 7x7 км.

К сожалению, некоторые заявленные параметры, например, содержание взвешенных веществ, спутник измеряет не очень успешно. Информацию о спутнике можно найти в (<https://innoter.com/articles> 2015).

Общепринятое при спутниковых измерениях содержание метана в мкмоль/м<sup>2</sup> нами переведено в тоже общепринятое при прямых измерениях у поверхности земли мкг/м<sup>2</sup>. Спутниковые данные использованы выборочно за последние 20 лет.

### Результаты и обсуждение

Согласно (Гинзбург и др., 2008; Роль метана, 2018; Boucher et al., 2009; Fang et al., 2013; Saunois et al., 2016; Smith et al., 2021 и др.) доля различных источников, выделяющих метан, хорошо известна и эти доли достаточно устойчивы, а временные колебания невелики. Больше всего выделяют метан заболоченные территории (26 %), далее следует энергетика (около 20 %), жвачные животные (18 %), рисовые поля (11 %). Значимыми источниками также являются сжигание биомассы (7 %) и мусорные свалки (9 %). В Казахстане заболоченных территорий нет, естественно, что основное внимание уделено энергетике, т. е. добыче углеводородов. Наиболее значимым ископаемым топливом в Республике являются уголь, нефть, а также газ. Нефтепромыслы и газодобыча (в основном попутного газа) сосредоточены в западной части территории Республики от Каспийского моря (включая его северный шельф) до границы с Российской Федерацией на севере. Добыча угля сосредоточена в центральных районах Республики (район Караганды), а также на северо-востоке (Экибастуз) (рисунок 1).

В районе Караганды добыча угля осуществляется шахтным способом и содержание метана на тонну добытого угля одно из самых высоких в мире (Гинзбург и др., 2008).

В районе Экибастуза расположен крупнейший в мире угольный разрез. Имеются и другие разрабатываемые или заброшенные источники добычи угля, которые в наших расчётах учтены в строгом соответствии с (Руководящие принципы, 2006). Согласно этому документу, метан входит в раздел «Летучие эмиссии», составляя их основную часть. Категория «Летучие эмиссии» предусматривает отдельный учёт выбросов по двум подкатегориям: «Твёрдые топлива», т.е. уголь, и «Жидкие и газообразные топлива» и это облегчает нам анализ данных.



Рисунок 1 – Карта Казахстана с точками, в которых снимались величины  $\text{CH}_4$  по данным спутников

Следует отметить, что в Казахстане в течение последних 10-15 лет по инициативе руководства страны имеет место процесс модернизации добывающих предприятий при больших инвестициях в технологии добычи и переработки. С материалами по проблеме можно ознакомиться по адресу (<https://snipks.online/oil-gas/doc/mun19-10.pdf>) и др.

В результате, несмотря на общее заметное увеличение добычи нефти и газа по сравнению с базовым 1990 г. эмиссии метана заметно снизились с 73047.67 тыс. т. 46628.4  $\text{CO}_2$ -эквивалента, т.е. на 36.1 %.

Рассмотрим динамику метана по отраслям.

*Подкатегория Угольная промышленность.* Добыча определяется спросом на уголь, а на угле работает большинство электростанций центрального и восточного Казахстана, также имеет место большой спрос на уголь от населения, поскольку зимние температуры в Казахстане сравнимы с сибирскими (Синоптические процессы Средней Азии, 1957). Имеет место также торговля углём с соседними и другими странами, особенно в связи с энергетическим кризисом в Европе. В то же время в самом Казахстане ведутся мероприятия по снижению зависимости от угля, осуществляется перевод на газ электростанций в Западном Казахстане, ведётся газификация районов в сельской местности, где это возможно. В результате мы уже имеем заметное уменьшение объёмов добычи угля при росте производства электроэнергии (рисунок 2).

Из рисунка 2 также видно, что в базовом 1990 г. почти половина добываемого угля осуществлялась подземным способом. В Казахстане добыча ведётся с горизонта 400 м и глубже, т. е. шахты глубокие и содержание метана составляет  $25\text{ м}^3/1$  тонну угля и более (Гинзбург и др., 2008).

Нами рассчитаны эмиссии метана от шахт и карьеров за период с 1990 по 2021 год. При этом нами учитывались эмиссии не только от подземной добычи угля. Но также эмиссии законсервированных шахт, эмиссии карьеров во время добычи и после неё, эндогенные пожары на отвалах карьеров, как это требуют (Руководящие принципы, 2006).

Поскольку в 1990 г. добывалось самое большое количество угля (142.6 млн т.), в т. ч. около половины шахтным способом, то за рассматриваемые годы наибольшие эмиссии метана от этой отрасли тоже были наибольшими, 33 млн.т.

К 2021 г. добыча угля сократилась до 106 млн т., т. е. на 25.6 %, 13 шахт были закрыты и переведены на режим консервации. При этом добыча именно подземным способом сократилась с 58,3 до 3 млн т. Выбросы метана соответственно уменьшились с 25 до 3 млн.т. в эквиваленте  $\text{CO}_2$  (рисунок 3)

На рис. 3 представлена структура источников эмиссий метана в подразделе «Твёрдое топливо». Видно, что доля эмиссий от карьеров увеличилась с 9 до 36 %, а от подземной добычи уменьшилась с 73 до 35 % при общем уменьшении эмиссий метана в 3.3 раза.

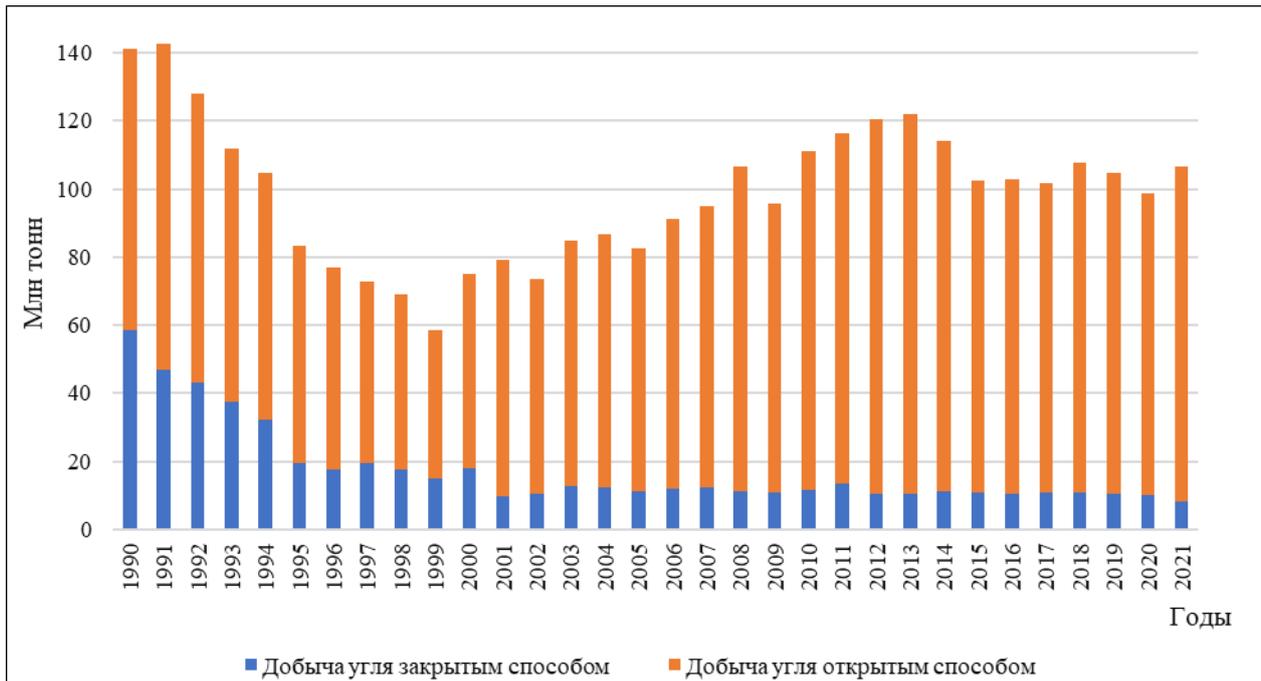


Рисунок 2 – Динамика добычи угля открытым и закрытым способами

Карьерная добыча угля после некоторого снижения в девяностые годы начала расти в настоящее время превышает уровень 1990 г. (рисунок 2). Соответственно, эмиссии  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  тоже увеличились (рисунок 3). Известно, что при карьерной

добыче эмиссии  $\text{CO}_2$  несколько превышают эмиссии  $\text{CH}_4$ , что мы и наблюдаем (рисунок 3).

Эмиссии метана от добычи угля в настоящий период составляют 140 – 150 тыс. т. в год в зависимости от конкретных объёмов добычи.

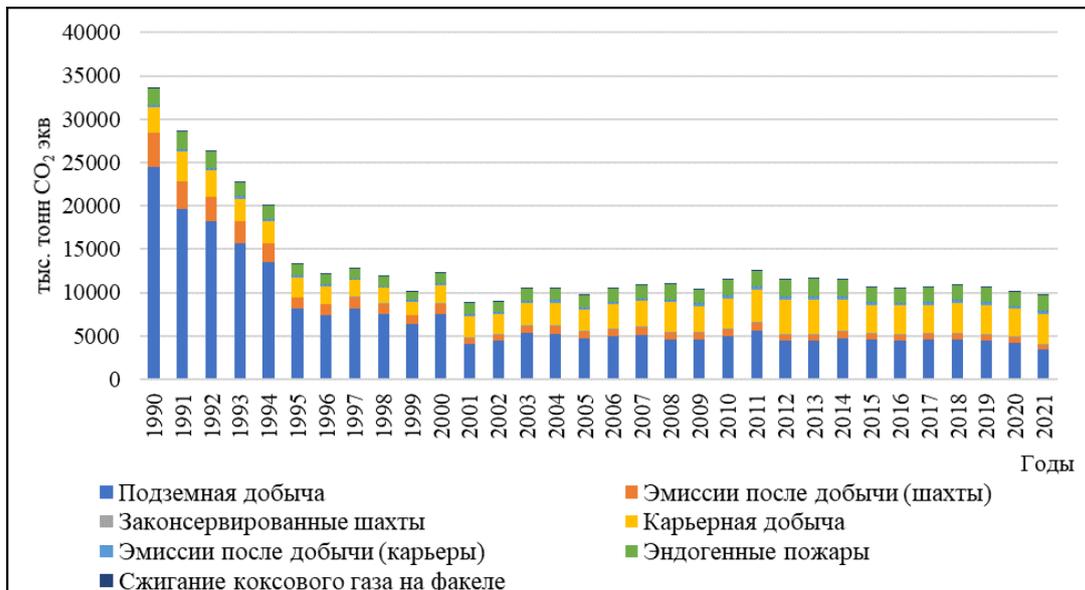


Рисунок 3 – Суммарные эмиссии метана (в  $\text{CO}_2$  экв.) от твёрдого топлива по всем категориям

Подкатегория «Нефть и газ». За время обретения независимости (30 лет) объёмы добычи нефти выросли в три раза (с 25.8 до 86.2 млн т.) а добыча газа – в 6.5 раза (с 7 до 45 млрд м<sup>3</sup>). При добыче нефти основным источником метана является попутный газ.

Расчёты эмиссий метана согласно (Руководство, 2006) сделаны для этапов разведки, добычи, транспортировки и хранения нефти. Вторым по значимости источником эмиссий является переработка нефти, роль других эмиссий не значима (рисунок 4).

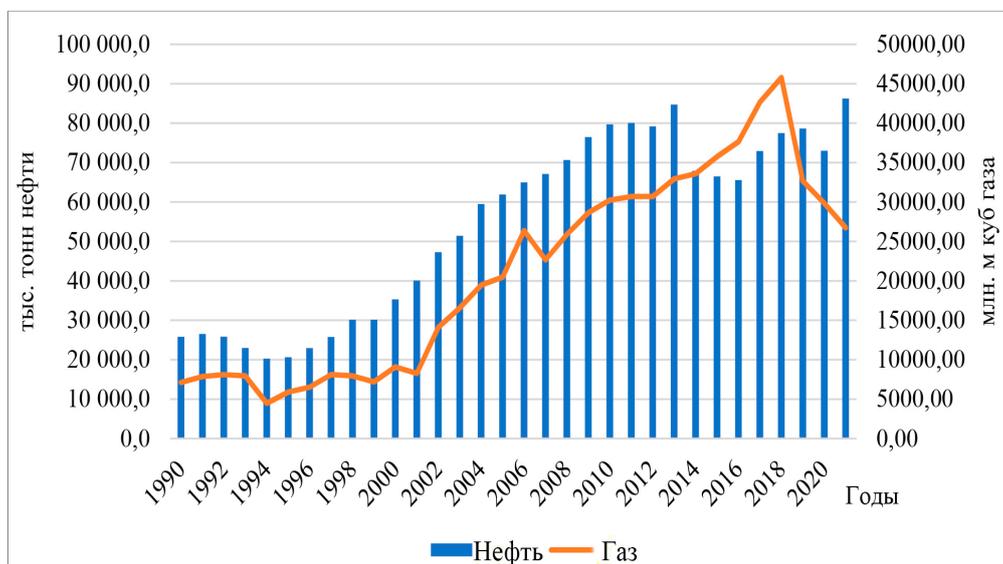


Рисунок 4 – Динамика добычи нефти и газа за время обретения независимости

Улучшение технологий добычи, транспортировки и переработки нефти не только существенно снизило эмиссии на единицу продукции, но и суммарные эмиссии, несмотря на значительный рост добычи (рисунок 4). Изменилось также соотношение величин эмиссий от разных источников.

Так, в базовом 1990 г. эмиссии от добычи нефти составляли 83 % в общей сумме, а в 2021 г. – только 32 %. Основным источником эмиссий в настоящее время является переработка нефти, на её долю приходится 59 % эмиссий, вместо 15 % в 1990 г. Это произошло по двум причинам: существенное уменьшение эмиссий при добыче и увеличение объёмов переработки в три раза.

Увеличение эмиссий при транспортировке с 3 до 6 % обусловлено тем, что увеличились объёмы транспортировки за пределы Республики, внутреннее потребление при этом выросло незначительно (рисунок 5).

Добыча газа в республике относительно невелика. Значительную долю составляет попутный газ при добыче нефти. Соответственно, рост добываемого газа обусловлен ростом добычи нефти. Оценка эмиссий, связанных с добычей

газа, производилась для следующих категорий: добыча, переработка, транспортировка и перераспределение.

Можно видеть, что, как и в нефтедобыче, в течение лет, за которые выполнены расчёты, вклад источников эмиссий не менялся.

В настоящее время до 58 % эмиссий имеют место при транспортировке, 20 % – при переработке и 19 % при добыче, хотя в девяностые годы добыча была основным источником эмиссий. Изменения обусловлены тем, что выросли объёмы собственного потребления газа и заметно удлинились транспортные магистрали. В настоящее время газ транспортируется через территории России, Узбекистана и за их пределы.

Значимым источником эмиссий является продувка систем и сжигание газа в факелах.

И хотя при этом метан практически весь сжигается, выделяется CO<sub>2</sub>. В 2013 г. Эмиссии CO<sub>2</sub> составили 14.7 млн т., что превышает эмиссии базового года в 3.5 раза (рисунок 6).

К настоящему времени административными усилиями удалось существенно снизить такие эмиссии, до 9.05 млн. т. в 2021 г.



Рисунок 5 – Вклад в общие эмиссии различных видов транспортировки нефти

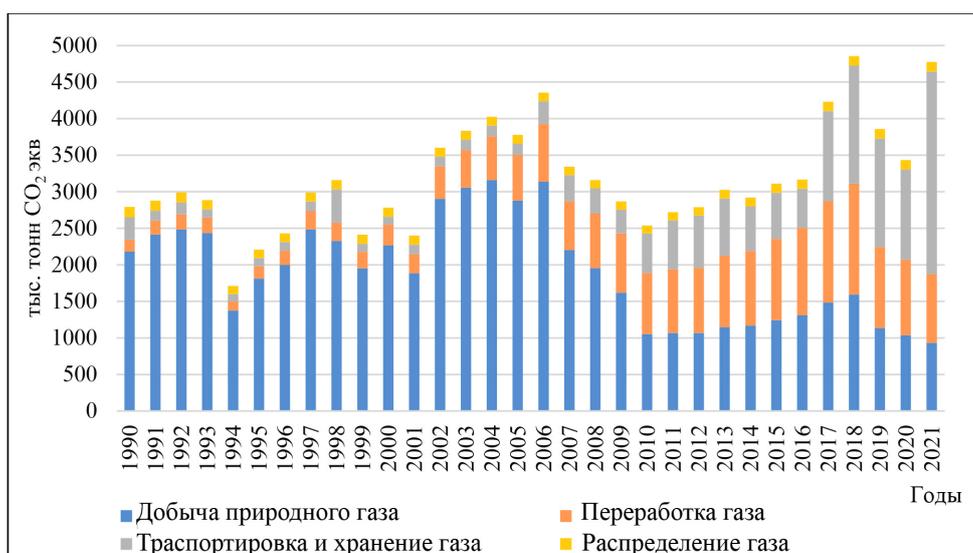


Рисунок 6 – Эмиссии метана (в единицах CO<sub>2</sub>) от различных процессов при добыче газа

В то же время доля эмиссий от продувки систем растет, что естественно при росте добычи. К 2021 г. она выросла до 66 % против 34 % в начале периода.

На рисунке 7 представлены выбросы метана в сравнении 1990 г. (начало периода) и 2021 г. (настоящее время).

Можно видеть, что источники выбросов и их вклад существенно изменились. Выбросы от добычи твёрдого топлива уменьшились практически

вдвое, выбросы от факельного сжигания увеличились в 3.5 раза, выбросы от добычи газа тоже увеличились в три раза. В то же время общие эмиссии метана за это время уменьшились с 73 до 46.6 млн.т, т.е. почти в два раза. Доля метана в общем балансе парниковых газов тоже уменьшилась с 16.8 % в 1990 г. до 6.5 % в настоящее время, что безусловно является обнадеживающим фактором.

Регулярно выполняемая инвентаризация метана не даёт представления о его прост-

ранственном распределении, концентрациях и годовом ходе этого вещества. Чтобы получить такие данные, мы обратились к данным спутников.

В таблице 1 представлены статистические данные о концентрациях  $\text{CH}_4$  в срединные меся-

цы сезонов и в среднем за год. Эти данные сняты с карт среднемесячных величин  $\text{CH}_4$  по данным спутника.

Съём информации осуществлялся в 20 точках, которые обозначены на рисунке 1 и в таблице 1.

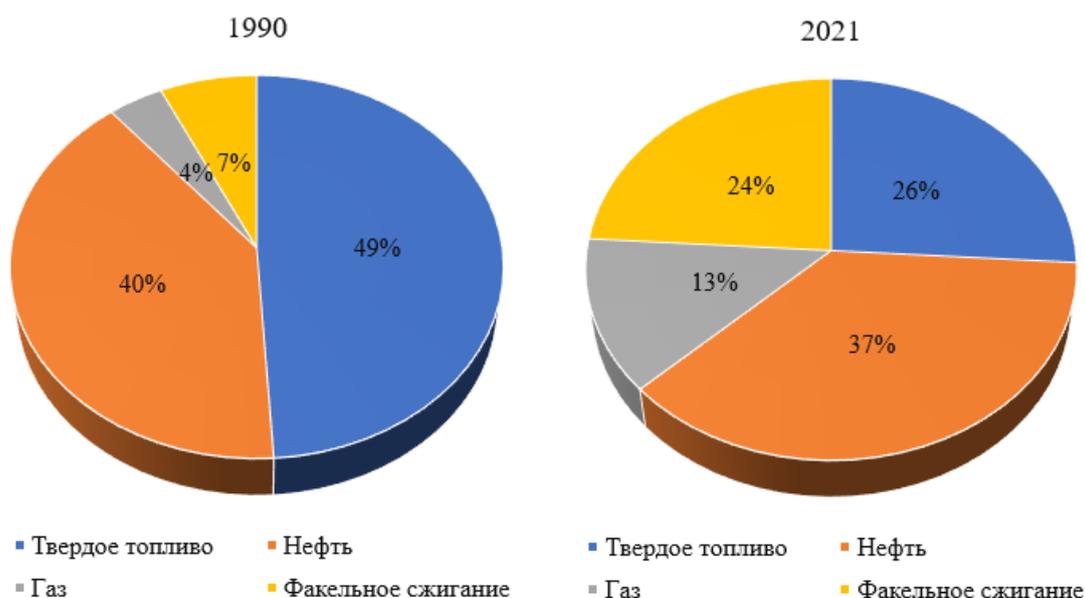


Рисунок 7 – Динамика эмиссий  $\text{CH}_4$  в сравнении 1990 и 2021 гг.

Таблица 1 – Среднегодовые концентрации  $\text{CH}_4$  за срединные месяцы ( $\text{мг/м}^3$ ,  $\text{ppb/m}^3$ )

№	Станции	Январь				Апрель				Июль				Октябрь			
		2009	2010	2011	Среднее	2009	2010	2011	Среднее	2009	2010	2011	Среднее	2009	2010	2011	Среднее
1	Алматы	0,86	0,76	0,81	0,81	0,81	0,85	1,00	0,89	0,82	0,80	0,89	0,84	0,96	0,89	0,89	0,91
2	Талдыкорган	0,82	0,73	0,73	0,76	0,83	0,86	1,05	0,91	0,77	0,76	0,84	0,79	0,98	0,90	0,90	0,93
3	Тараз	0,86	0,75	0,86	0,82	0,88	0,88	0,99	0,92	0,91	0,89	0,99	0,93	1,07	0,88	0,87	0,94
4	Шымкент	0,79	0,73	0,83	0,78	0,86	0,89	0,98	0,91	0,82	0,80	0,89	0,84	1,08	0,87	0,85	0,93
5	Кызылорда	0,78	0,69	0,86	0,78	0,86	0,89	0,97	0,91	0,86	0,85	0,89	0,86	1,17	0,97	0,88	1,01
6	Костанай	0,70	0,75	0,78	0,74	0,81	0,73	0,75	0,76	0,73	0,82	0,81	0,78	0,83	0,85	0,88	0,85
7	Петропавловск	0,69	0,77	0,81	0,76	0,73	0,86	0,85	0,81	0,69	0,72	0,79	0,73	0,84	0,86	0,86	0,85
8	Павлодар	0,66	0,76	0,81	0,74	0,75	0,95	0,91	0,87	0,67	0,71	0,76	0,71	0,87	0,86	0,89	0,87
9	Экибастуз	0,71	0,77	0,81	0,76	0,76	0,96	0,93	0,88	0,74	0,75	0,79	0,76	0,96	0,98	0,90	0,95
10	Астана	0,68	0,75	0,83	0,75	0,87	0,96	0,87	0,90	0,67	0,71	0,79	0,72	0,88	0,99	0,97	0,95
11	Усть-Каменогорск	0,80	0,84	0,81	0,82	0,85	0,86	0,99	0,90	0,65	0,75	0,80	0,73	0,86	0,95	0,97	0,93
12	Семипалатинск	0,80	0,76	0,81	0,79	0,86	0,87	0,98	0,90	0,64	0,75	0,79	0,72	0,88	0,96	0,95	0,93
13	Риддер	0,75	0,66	0,79	0,73	0,84	0,88	1,00	0,91	0,69	0,76	0,78	0,74	0,88	0,97	0,99	0,95

Продолжение таблицы

№	Станции	Январь				Апрель				Июль				Октябрь			
		2009	2010	2011	Среднее	2009	2010	2011	Среднее	2009	2010	2011	Среднее	2009	2010	2011	Среднее
14	Уральск	0,80	0,83	0,72	0,78	0,87	0,87	0,93	0,89	0,76	0,82	0,88	0,82	1,07	0,89	0,85	0,94
15	Актау	0,85	0,83	0,71	0,79	0,96	0,77	0,88	0,87	0,85	0,98	0,99	0,94	1,03	0,89	0,95	0,96
16	Атырау	0,82	0,71	0,71	0,75	0,88	0,86	0,92	0,89	0,81	0,89	0,89	0,86	1,09	0,89	0,85	0,94
17	Актобе	0,72	0,75	0,76	0,74	0,87	0,75	0,77	0,80	0,91	0,80	0,79	0,83	1,01	0,95	0,95	0,97
18	Караганда	0,74	0,75	0,88	0,79	0,88	0,99	1,05	0,97	0,64	0,72	0,79	0,71	0,97	0,97	0,97	0,97
19	Балхаш	0,78	0,80	0,76	0,78	0,89	0,95	1,07	0,97	0,83	0,75	0,85	0,81	0,98	1,06	0,97	1,00
20	Жезказган	0,67	0,75	0,86	0,76	0,90	0,99	1,03	0,97	0,83	0,80	0,78	0,80	1,00	1,00	0,97	0,99
	Сумма	15,28	15,14	15,94	15,43	16,96	17,62	18,92	17,83	15,29	15,83	16,78	15,92	19,41	18,58	18,31	18,77
	Среднее	0,76	0,76	0,80	0,77	0,85	0,88	0,95	0,89	0,76	0,79	0,84	0,80	0,97	0,93	0,92	0,94

Можно видеть, что концентрации  $\text{CH}_4$  самые высокие в октябре и самые низкие в январе. При этом только в Павлодаре и Караганде концентрации  $\text{CH}_4$  в октябре были такими же как и в июле. В апреле на большинстве станций концентрации  $\text{CH}_4$  выше, чем в июле.

Как известно, промышленные предприятия по добыче энергоресурсов, с которыми связаны выбросы  $\text{CH}_4$ , летом работают в таком же режиме, как и зимой. В то же время использование энергоресурсов зимой в Казахстане из-за низких температур заметно выше, чем летом. И тем не менее, несмотря на большой вклад энергетических предприятий в выбросы метана, на его концентрациях в Республике это не проявляется. Наличие максимума концентраций  $\text{CH}_4$  в октябре можно предположительно объяснить минимальной активностью синоптических процессов в этот период и слабыми ветрами, не способствующими перемешиванию.

Спутник даёт нам содержание метана во всём столбе атмосферы. Согласно (Saunois 016 и др.) средние концентрации метана во всём столбе атмосферы составляют  $1.72 \pm 0.19$  ppb/ $\text{m}^2$ . Из таблицы следует, что полученные нами концентрации  $\text{CH}_4$  для Казахстана в два раза ниже,  $0.92 \pm 0.2119$  ppb/ $\text{m}^2$ .

Представляет также интерес, какие концентрации  $\text{CH}_4$  у поверхности земли. Воспользуемся для этого информацией о вертикальном распределении метана в атмосфере. Согласно (Foster., et al. 2021; GMI, 2015; Nakazawa et al.1997 и др.) в

тропосфере содержится 88 % метана и его концентрации,  $1.7$  ppb/ $\text{m}^3$ , довольно устойчивы по времени и почти не изменяются по высоте. Согласно стандарту атмосферы США в тропосфере содержится 90 % метана при тех же величинах концентраций. Известно, что  $1$  ppb/ $\text{m}^3$  равен  $1$  мкг/кг, т.е. примерно равен  $1$  мкг/ $\text{m}^3$  у поверхности земли. Согласно нашим данным, самые высокие среднемесячные концентрации  $\text{CH}_4$  близки к  $1$  мг/ $\text{m}^2$ , оставаясь несколько ниже, но мы возьмём  $1$  мг/ $\text{m}^2$ . Приняв, что толщина тропосферы равна  $10$  км и взяв 90 % от наших концентраций мы получим, что концентрации метана у земли на территории Казахстана не превышают  $1$  мкг/ $\text{m}^3$ . Данная цифра в полтора раза ниже приведённых в (Saunois, et al. 2016 и др.).

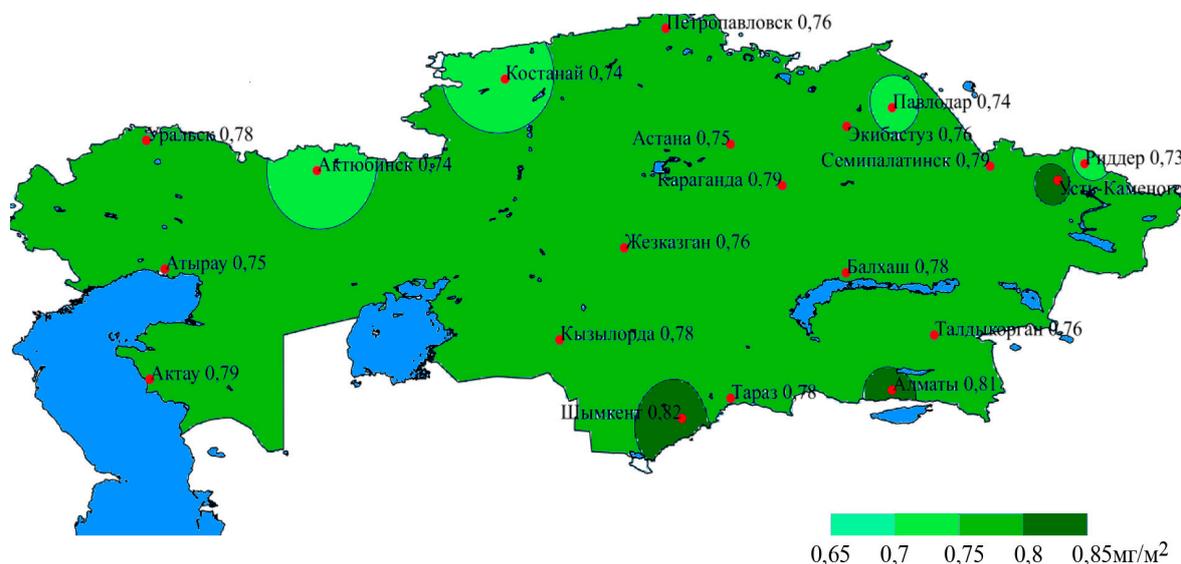
Представлялось интересным выяснить, проявляются ли по спутниковым данным хотя бы основные источники выбросов метана. Постоянно действующие источники должны проявляться на среднемесячных картах концентраций  $\text{CH}_4$ , особенно в месяцы с наиболее спокойным состоянием атмосферы, когда вынос и рассеяние  $\text{CH}_4$  минимально. Этому способствует также наличие в зимние месяцы приземной или приподнятой инверсий над большей частью территории Казахстана, обусловленное влиянием гребня сибирского антициклона, ось которого ориентирована с востока на север и проходит через центральные районы Казахстана (Синоптические процессы Средней Азии, 1957; Гирс 1997).

На рисунке 8 представлено распределение концентраций  $\text{CH}_4$  по территории Республики в январе.

Прежде всего отметим, что концентрации  $\text{CH}_4$  в январе изменяются по территории Республики всего от 0.66 до 0.86  $\text{мг}/\text{м}^2$ , т.е. в небольших пределах. Далее, анализируя пространственную изменчивость  $\text{CH}_4$ , мы имеем в виду величины в несколько сотых от их средних значений на территории Казахстана. На карте-схеме рисунке 8 хорошо выделяется область повышенных концентрации  $\text{CH}_4$  в районе Караганды, где у нас расположены угольные шахты. Несмотря на заметное уменьшение добычи угля шахтным способом, выделение  $\text{CH}_4$  в этом районе всё ещё заметное.

Изолинии концентраций имеют направление, близкое к широтному, при этом минимальные концентрации имеют место на севере территории и повышаются к югу. Это несколько не согласуется с нашими представлениями об основных источниках выделения  $\text{CH}_4$  (Синоптические процессы Средней Азии, 1957). Если считать, что основными источниками являются болота, то высокие концентрации  $\text{CH}_4$  должны иметь место над Западной Сибирью и оттуда поступать на территорию Казахстана. В январе мы этого не наблюдаем, возможно причина в том, что в январе болота Сибири и тундры замерзают.

Рассмотрим карту-схему за июль этого же года (рисунок 9).



**Рисунок 8** – Распределение среднемесячных концентраций метана ( $\text{мг}/\text{м}^2$ ) по территории Казахстана за январь 2019 – 2021 гг.

Можно видеть, что в июле концентрации  $\text{CH}_4$  изменяются от 0.64 до 0.94  $\text{мг}/\text{м}^2$ , т.е. немного шире, чем в январе. И в июле главная особенность пространственного распределения концентраций  $\text{CH}_4$  соблюдается: низкие концентрации на севере и высокие на юге, чем южнее тем выше концентрации  $\text{CH}_4$ . На фоне такой закономерности выделяется область повышенных концентраций над западными районами Республики, где сосредоточены основные нефтяные и газовые места добычи. Максимум

имеет место в районе Актюбинска, т. е. там существует какой-то дополнительный источник  $\text{CH}_4$ .

Вторая область повышенных концентраций  $\text{CH}_4$  имеет место в районе Алматы – Талдыкоргана – Балхаша. В отдельные месяцы, таких месяцев большинство, в районе Балхаша хорошо выделяется своя собственная область повышенных концентраций  $\text{CH}_4$ . Самые высокие концентрации  $\text{CH}_4$  имеют место, однако, в районе Шымкента (рисунок 9).

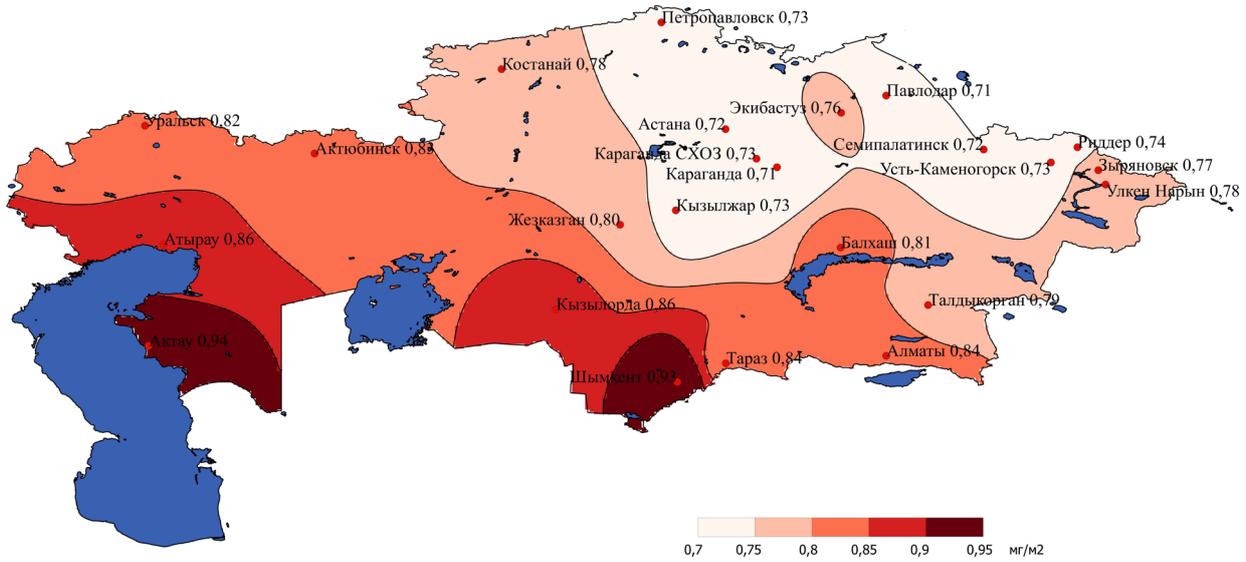


Рисунок 9 – Распределение среднемесячных концентраций метана (мг/м<sup>3</sup>) по территории Казахстана за июль 2019 – 2021 гг.

В апреле (рисунок 10) области повышенных концентраций CH<sub>4</sub> хорошо выделяются над центральными районами территории: один с центром над Жезказганом, а второй, более обширный, – над Карагандой – Балхашом. Самостоятельная область повышенных концент-

раций имеет место над западными районами Республики, где сосредоточена нефтяная и газовая промышленность. Концентрации CH<sub>4</sub> в апреле выше, чем зимой и летом. Как и в зимний и летний сезоны, к северу концентрации CH<sub>4</sub> понижаются, а к югу повышаются.

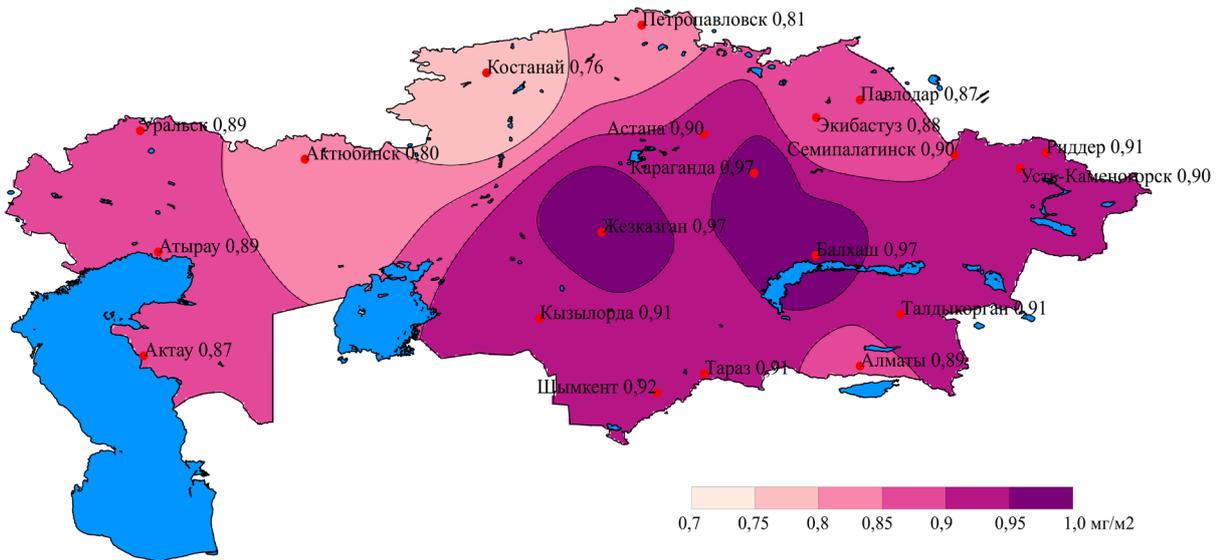


Рисунок 10 – Распределение среднемесячных концентраций метана (мг/м<sup>3</sup>) по территории Казахстана за апрель 2019 – 2021 гг.

В октябре (рисунок 11) область наибольших концентраций метана имеет место над центральными районами Республики. В отличие от дру-

гих сезонов по югу территории (Шымкент – Талдыкорган – Семипалатинск) концентрации  $\text{CH}_4$  ниже, чем над центральными районами

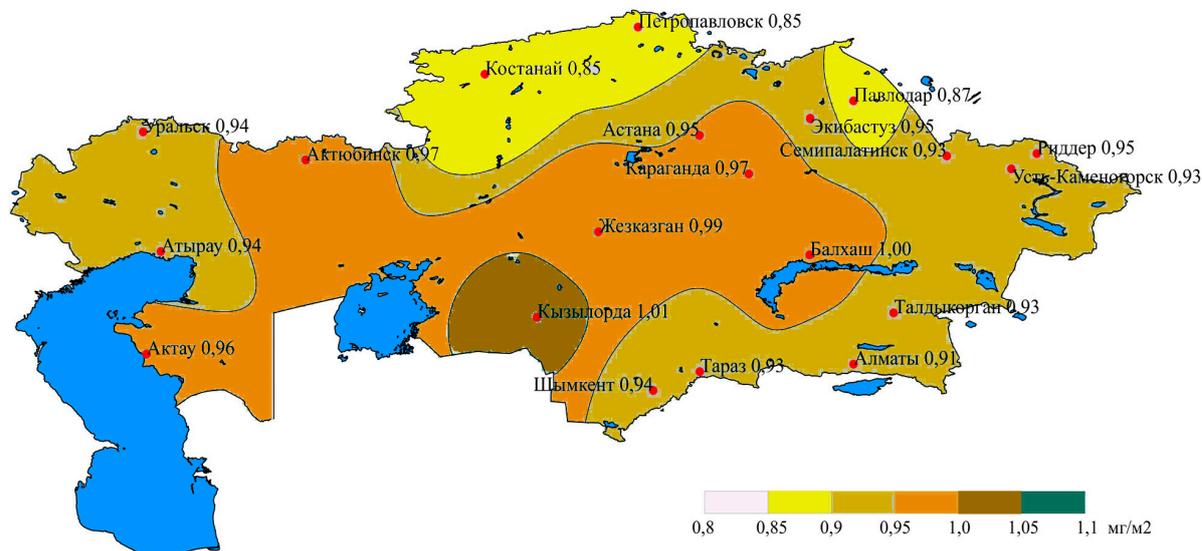


Рисунок 11 – Распределение среднемесячных концентраций метана ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) по территории Казахстана за октябрь 2019–2021 гг.

Однако самые низкие концентрации  $\text{CH}_4$  имеют место в самых северных районах (Костанай, Павлодар), т.е. общее правило самых низких концентраций  $\text{CH}_4$  на севере территории сохраняется и в октябре. В октябре отмечаются самые высокие концентрации  $\text{CH}_4$ .

Анализ временного ряда с данными инвентаризации выбросов метана за более чем тридцатилетний период показывают, что величины выбросов уменьшились во всех областях, где они имеют место. Основным фактором, приведшим к нынешнему уменьшению выбросов, является совершенствование технологий добычи, транспортировки и переработки нефти и газа, а также в некоторой степени и угля. В угольной отрасли основным фактором, который привёл к уменьшению выбросов метана, стало уменьшение шахтной добычи угля и увеличение открытой добычи. По этому пути идёт большинство стран, особенно европейские, прикладываящие большие усилия к этому, и у них тоже имеет место существенное сокращение выбросов метана, которое должно привести и к существенному уменьшению антропогенной составляющей в глобальное потепление (CLRTAP, 2018; European Commission, 2020; GMI, 2015; Höglund-Isaksson, *et al.* 2020 и др.). Как известно, и это

нами отмечено в предисловии, с метаном связан не только парниковый эффект, но и его содействие более быстрому образованию приземного озона, который является одним из наиболее опасных для здоровья загрязняющих веществ (European Commission, 2020; Fanelli, 2007; Mar at al. 2022; Van Dingenen и др.). Сокращение выбросов метана способствует и уменьшению заболеваемости.

Обсуждая любое вещество, обладающее парниковым эффектом, мы, как правило, говорим и о его экологической значимости. В результате создаётся впечатление, что, решая одну проблему, мы автоматически решаем и другую. Однако в работах (Loulergue at al. 2008; Petit at al.1999), выполненных на основе анализа ледовых кернов из Антарктиды, показано, что потепления и похолодания в истории Земли имели место и ранее, особенно выражен цикл в 120 тыс. лет. Для этого цикла согласно (Loulergue at al. 2008; Petit at al.1999) характерен очень быстрый рост температуры, а затем медленное её понижение в несколько более коротких циклов. Следовательно, потепления и похолодания на планете имели место и ране за последние полмиллиона лет, когда антропогенного влияния человека просто не было. Примечательно, что ход концентраций

углекислого газа и метана тоже очень хорошо коррелируют с ходом температуры планеты, указывая нам что антропогенное влияние вторично. Тогда что же является первопричиной температурных колебаний на планете в прошлом? Циклы потеплений и похолоданий очень хорошо согласуются с величинами инсоляции, рассчитанными Миланковичем для широты  $65^\circ$ , т.е. с астрономическими факторами (положение Земли относительно других планет, колебание оси планеты и пр.) (Миланкович, 1939). Влиять на астрономические факторы мы пока не можем. Отсюда следует, что с изменением климата мы должны смириться и постепенно приспосабливаться к этим изменениям.

Что же касается экологии, то здесь практически всё в наших руках, уменьшение выбросов парниковых газов — это тоже путь к улучшению экологии, и мы должны этим заниматься, но ожидать, что рост температуры прекратится, не стоит. И ещё: ископаемые ресурсы — это не только топливо, но и ценный продукт для химической промышленности, тот же метан (Paciñco *et al.* 2023 и др.). Поэтому ожидать, что человечество полностью прекратит добычу ископаемых топлив тоже не стоит, необходимы разумная добыча и переработка при минимальном ущербе для окружающей среды.

Мы получили по спутниковым данным, что концентрации метана несколько ниже, чем по данным других авторов. При этом минимальные концентрации во все сезоны характерны для северных районов территории. Севернее территории Казахстана в Западной Сибири расположены крупнейшие болотные территории и было естественно ожидать, что по крайней мере летом оттуда будут поступать воздушные массы с повышенными концентрациями метана. Однако этого не наблюдается. В то же время пространственная изменчивость концентраций метана невелика.

Авторы (Qin *et al.* 2016; Nakazawa *et al.* 1997) нашли, что в Китае и над некоторыми районами России концентрации метана тоже несколько ниже, чем принято считать (Роль метана 2018; Foster *et al.* 2021; Höglund-Isaksson, L, *et al.* 2020 и др.). Это как-то поддерживает наши результаты.

Карты пространственного распределения метана, построенные за трехлетний период, дают достаточно сглаженную картину распределения концентраций, не всегда привязанную к источ-

никам, что обусловлено осреднением влияния метеорологических условий. Карты концентраций  $\text{CH}_4$  за отдельный месяц года, как правило, более информативны. Но по техническим причинам представить такие снимки в работе не представляется возможным.

## Выводы

За тридцатилетний период инвентаризации выбросы метана от добычи угля сократились в десять раз, с 33 млн. т до 3 млн. т. Это обусловлено тем, что добыча угля шахтным способом сильно сократилась, более чем в 10 раз. В то же время несколько выросла добыча угля открытым способом, до 106 млн. т. В настоящее время, против 146.2 млн. т. в 1990 г.

За прошедшие годы добыча нефти выросла в три раза, с 25.8 млн. т до 86.0 млн. т., однако выбросы метана за счёт улучшения технологий, добычи, транспортировки и переработки снизились с 27 млн. т. до 14 млн. т. в пересчёте на  $\text{CO}_2$ .

Добыча газа увеличилась в 6.5 раза, с 7.0 до 45 млрд.  $\text{m}^3$ , соответственно выбросы метана в пересчёте на  $\text{CO}_2$  увеличились с 2.7 млн. т. до 4.7 млн. т. Такой рост представляется естественным при росте добычи нефти и газа.

В сумме эмиссии метана от всех видов деятельности снизились за тридцатилетний период с 73.0 млн. т. до 46.6 млн. т., т. е. на 36 %.

Основным фактором снижения стали новые технологии добычи, транспортировки и переработки.

Спутниковые данные о концентрациях метана на территории Казахстана количественно несколько ниже, чем ожидалось. Несмотря на осреднения за трёхлетний период, они неплохо указывают на местоположение основных источников выбросов.

Самые высокие концентрации метана над Казахстаном имеют место в октябре, а также в апреле, а самое низкое в январе. Пространственная и временная изменчивость концентраций метана над Казахстаном невелика.

Заметное снижение выбросов парниковых газов в т. ч. метана в Казахстане, как и во всём мире, будет способствовать значительному улучшению всех составляющих окружающей среды. Надеяться, однако, что это приведет к прекращению глобального потепления, не стоит. Надо искать пути адаптации к неизбежному.

## Литература

- Boucher O, Friedlingstein P, Collin B, Shine K.P. 2009. The indirect global warming potential and global temperature change potential due to methane oxidation. *Environmental Research Letters* volume 4 number 4. DOI 10.1088/1748-9326/4/4/044007
- CLRTAP, 2018. Long-term strategy for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution for 2020 – 2030 and beyond. In Decision 2018/5.
- European Commission, 2020. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on an EU strategy to reduce methane emissions. Brussels: European Commission
- Fanelli D, «Meat Is Murder on the Environment», *New Scientist* 18 Jul. 2007
- Fang, Y., Naik, V., Horowitz, L. W., and Mauzerall, D. L.: Air pollution and associated human mortality: the role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1377 – 1394, <https://doi.org/10.5194/acp-13-1377-2013>, 2013.
- Foster, P., et al. 2021. The Earth's energy budget, climate feedbacks and climate sensitivity, *Climate Change 2021. The physical science bases. Contribution of Working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press
- Global Methane Initiative (GMI), 2015. Climate and Clean Air Coalition (CCAC), World Resource Institute (WRI), United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), US EPA Natural Gas STAR Program (Natural Gas STAR)
- Höglund-Isaksson, L, et al. 2020. Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe –results from the GAINS model. *Environ. Res. Commun.* 2 025004 DOI 10.1088/2515-7620/ab7457  
<https://innoter.com/articles/issledovanie-zagryazneniya-atmosfery-po-kosmicheskim-snimkam-sentinel-5p/>
- Jackson R.B., et al 2020. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environ. Res. Lett.* 15 071002 DOI 10.1088/1748-9326/ab9ed2
- Keppler F., Hamilton J.T., Braß M., Röckmann T. (2006). Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*. 439, 187 – 191;
- Kirschke S., Bousquet P. and an. Three decades of global methane sources and sinks // *Nature Geoscience* 2013. V. 6. № 10. P. 813 – 823.
- Louergue L., Schilt A., Spahni R., et al. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH<sub>4</sub> over the past 800,000 years // *Nature*. 2008. V. 453. P. 383 – 386.
- Mar K.A., Unger Ch, Walderdorff L, , Tim Butler, Beyond CO<sub>2</sub> equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health/*Environmental Science and Policy* 134 (2022) 122 – 136
- Nakazawa T., Sugawara S., Inoue G., Machida T., Maksyutov S., Mukai H. Aircraft measurements of the concentrations of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and CO and the carbon and oxygen isotopic ratios of CO<sub>2</sub> in the troposphere over Russia // *J. Geophys. Res. D*. 1997. V. 102, N 3. P. 3843 – 3859
- Pacífico J.A., Cesar Augusto Moraes De Abreu 2023 Efficient Performance of the Methane-Carbon Dioxide Reform Process in a Fluidized Bed Reactor/<https://www.mdpi.com/2674-0389/2/1/4>
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis J., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica // *Nature (Gr. Brit.)*. 1999. V. 399, N 6735. P. 429 – 436.
- Qin Kai, Wu Lixin, Wong Man Sing, Husi Letu , Mingyu Hua , Hongmei Lang , Shijie Sheng, Ji Yao Tenga , Xin Xiao , Limei Yuan 2016. Trans-boundary aerosol transport during a winter haze episode in China revealed by ground-based Lidar and CALIPSO satellite/ *Atmospheric Environment* 141, (2016), 20-29
- Saunois M., et al: The global methane budget 2000–2012, *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 697 – 751, <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>, 2016.
- Shindel, D., et al., 2017. A climate policy pathway for near and long-term benefits. *Science* 326, 716 – 718
- Shine K., Berntsen T., Fuglested J., Skeie R., Stuber N. 2007. Comparing the climate effect of emissions of short-and long-lived climate agents. *Phil. Trans. R. Soc. A* (2007) 365, 1903 – 1914, doi:10.1098/rsta.2007.2050
- Smith, C., Nicholls, Z. R., Armour, K., Collins, W., Forster, P., Meinshausen, M., ... & Watanabe, M. (2021). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity supplementary material. *Climate change*.
- Turner, M. et al. 2016. Long-Term Ozone Exposure and Mortality in a Large Prospective Study *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 3, 10, 1134 – 1142.
- Unger, C., Tielges, S., 2021 Preparing the playing field: climate club governance of the G20, Climate and clean Air Coalition, and under 2 Coalition. *Climate change* 167, 41.
- Van Dingenen, R., et al., 2018. Global trends of methane emissions and their impacts on ozone concentrations. JRC Science for policy Report European commission.
- Vandyck, T., et al., 2020. Quantifying air quality co-benefits of climate policy across sectors and regions. *Clim. Change* 163, 1501 – 1517.
- Winker D.M., Hunt W.H., Hosteller C. A., 2004. Status and performance of the CALIOP Lidar, *Proc.SPIE* vol 5575, 8-15. [Download Paper (PDF)]
- Winker, D.M., Hunt W.H., McGill M.J. 2007. Initial performance assessment of CALIOP, *geophys. Res. Lett.*, 34, L19803, doi:10.1029/2007GL030135. [Download Paper (PDF)]

- Winker, D.M., Vaughan, M.A., Omar, A., et al., 2009. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 26 (11), 2310e2323
- Zavala-Araiza D. et al. 2021 A tale of two regions: methane emissions from oil and gas production in offshore/onshore Mexico. *Environmental Research Letters*, Volume 16, Number 2 DOI 10.1088/1748-9326/abceeb
- Гинзбург А. С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // *Рос. хим. ж.* 2008. Т. LII. № 5. С. 112 – 119
- Гирс А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные метеорологические прогнозы. – Л., Гидрометеиздат, 1971, 488 с.
- Миланкович М. 1939. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. Пер. с нем. А.Х. Хргиана под ред. С.Л. Бастамова. – М.: ГОНТИ, – 207 с.
- Роль метана в изменении климата, 2018 / под ред. д.х.н., профессора А.Г. Ишкова. 124 с.
- Руководящие принципы национальной инвентаризации парниковых газов. МГЭИК. Гл. 4. Летучие эмиссии. Женева. 2006.-50с.
- Синоптические процессы Средней Азии/В.А. Бугаев, В.А. Джорджио и др. Ташкент, изд. АН Узбекской ССР, 1957, 447 с.

## References

- Boucher O, Friedlingstein P, Collin B, Shine K.P. 2009. The indirect global warming potential and global temperature change potential due to methane oxidation. *Environmental Research Letters* volume 4 number 4. DOI 10.1088/1748-9326/4/4/044007
- CLRTAP, 2018. Long-term strategy for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution for 2020 – 2030 and beyond. In Decision 2018/5.
- European Commission, 2020. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on an EU strategy to reduce methane emissions. Brussels: European Commission
- Fanelli D, «Meat Is Murder on the Environment», *New Scientist* 18 Jul. 2007
- Fang, Y., Naik, V., Horowitz, L. W., and Mauzerall, D. L.: Air pollution and associated human mortality: the role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1377 – 1394, <https://doi.org/10.5194/acp-13-1377-2013>, 2013.
- Foster., P., et al. 2021. The Earth`s energy budget, climate feedbacks and climate sensitivity, *Climate Change 2021. The physical science bases. Contribution of Working group! to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press
- Ginzburg A. S., Gubanova D.P., Minashkin V.M. Vliyanie estestvennyh i antropogennyh aerorozolej na globalnyj i regionalnyj klimat // *Ros. him. zh.* 2008. Т. LII. № 5. С. 112 – 119
- Girs A.A. Mnogoletnie kolebaniya atmosfernoj cirkulyacii i dolgosrochnye meteorologicheskie prognozy. – L., Gidrometeoizdat, 1971, 488 s.
- Global Methane Initiative (GMI), 2015. Climate and Clean Air Coalition (CCAC), World Resource Institute (WRI), United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), US EPA Natural Gas STAR Program (Natural Gas STAR)
- Höglund-Isaksson, L, et al. 2020. Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe –results from the GAINS model. *Environ. Res. Commun.* 2 025004 DOI 10.1088/2515-7620/ab7457 <https://innoter.com/articles/issledovanie-zagryazneniya-atmosfery-po-kosmicheskim-snimkam-sentinel-5p/>
- Jackson R.B., et al 2020. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environ. Res. Lett.* 15 071002 DOI 10.1088/1748-9326/ab9ed2
- Keppeler F., Hamilton J.T., Braß M., Röckmann T. (2006). Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature.* 439, 187 – 191;
- Kirschke S., Bousquet P. and an. Three decades of global methane sources and sinks // *Nature Geoscience* 2013. V. 6. № 10. P. 813 – 823.
- Louergue L., Schilt A., Spahni R., et al. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH<sub>4</sub> over the past 800,000 years // *Nature.* 2008. V. 453. P. 383 – 386.
- Mar K.A., Unger Ch, Walderdorff L, , Tim Butler, Beyond CO<sub>2</sub> equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health/*Environmental Science and Policy* 134 (2022) 122 – 136
- Milankovich M. 1939. Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebanij klimata. Per. s nem. A.H. Hrgiana pod red. S.L. Bastamova. – М.: GONTI, – 207 с.
- Nakazawa T., Sugawara S., Inoue G., Machida T., Maksyutov S., Mukai H. Aircraft measurements of the concentrations of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and CO and the carbon and oxygen isotopic ratios of CO<sub>2</sub> in the troposphere over Russia // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 3. P. 3843 – 3859
- Pacífico J.A., Cesar Augusto Moraes De Abreu 2023 Efficient Performance of the Methane-Carbon Dioxide Reform Process in a Fluidized Bed Reactor/<https://www.mdpi.com/2674-0389/2/1/4>
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis J., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica // *Nature (Gr. Brit.)*. 1999. V. 399, N 6735. P. 429 – 436.

- Qin Kai, Wu Lixin, Wong Man Sing, Husi Letu , Mingyu Hua , Hongmei Lang , Shijie Sheng, Jiyao Tenga , Xin Xiao , Limei Yuan 2016. Trans-boundary aerosol transport during a winter haze episode in China revealed by ground-based Lidar and CALIPSO satellite/ *Atmospheric Environment* 141, (2016), 20-29
- Rol metana v izmenenii klimata, 2018 / pod red. d.h.n., professora A.G. Ishkova. 124 c.
- Rukovodyashie principy nacionalnoj inventarizacii parnikovyh gazov. MGEIK. Gl. 4. Letuchie emissii. Zheneva. 2006.-50s.
- Saunois M., at al: The global methane budget 2000–2012, *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 697 – 751, <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>, 2016.
- Shindel, D., at al., 2017. A climate policy pathway for near and long-term benefits. *Science* 326, 716 – 718
- Shine K., Berntsen T., Fuglestvedt J., Skeie R., Stuber N. 2007. Comparing the climate effect of emissions of short-and long-lived climate agents. *Phil. Trans. R. Soc. A* (2007) 365, 1903 – 1914, doi:10.1098/rsta.2007.2050
- Sinopticheskie processy Srednej Azii/V.A. Bugaev, V.A. Dzhordzhio i dr. Tashkent, izd. AN Uzbekskoj SSR, 1957, 447 s.
- Smith, C., Nicholls, Z. R., Armour, K., Collins, W., Forster, P., Meinshausen, M., ... & Watanabe, M. (2021). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity supplementary material. *Climate change*.
- Turner, M. et al. 2016. Long-Term Ozone Exposure and Mortality in a Large Prospective Study *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 3, 10, 1134 – 1142.
- Unger, C., Tielges, S., 2021 Preparing the playing field: climate club governance of the G20, Climate and clean Air Coalition, and under 2 Coalition. *Climate change* 167, 41.
- Van Dingenen, R., at al., 2018. Global trends of methane emissions and their impacts on ozone concentrations. JRC Science for policy Report European commission.
- Vandyck, T., et al., 2020. Quantifying air quality co-benefits of climate policy across sectors and regions. *Clim. Change* 163, 1501 – 1517.
- Winker D.M., Hunt W.H., Hosteller C. A., 2004. Status and performance of the CALIOP Lidar, *Proc.SPIE* vol 5575, 8-15. [Download Paper (PDF)]
- Winker, D.M., Hunt W.H., McGill M.J. 2007. Initial performance assessment of CALIOP, *geophys. Res. Lett.*, 34, L19803, doi:10.1029/2007GL030135. [Download Paper (PDF)]
- Winker, D.M., Vaughan, M.A., Omar, A., et al., 2009. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 26 (11), 2310e2323
- Zavala-Araiza D. et al. 2021 A tale of two regions: methane emissions from oil and gas production in offshore/onshore Mexico. *Environmental Research Letters*, Volume 16, Number 2 DOI 10.1088/1748-9326/abceeb