

Измерение выбросов парниковых газов и оценка поглощающей способности гидроэнергетических объектов

Ирина Репина

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН



Москва, 22.11.2024

РИТМ
УГЛЕРОДА

Земная система: вопросы для принятия решений

«Элементарные» вопросы к климатической науке

✓ Что происходит (с климатом, с экосистемой)?

✓ Почему это происходит?

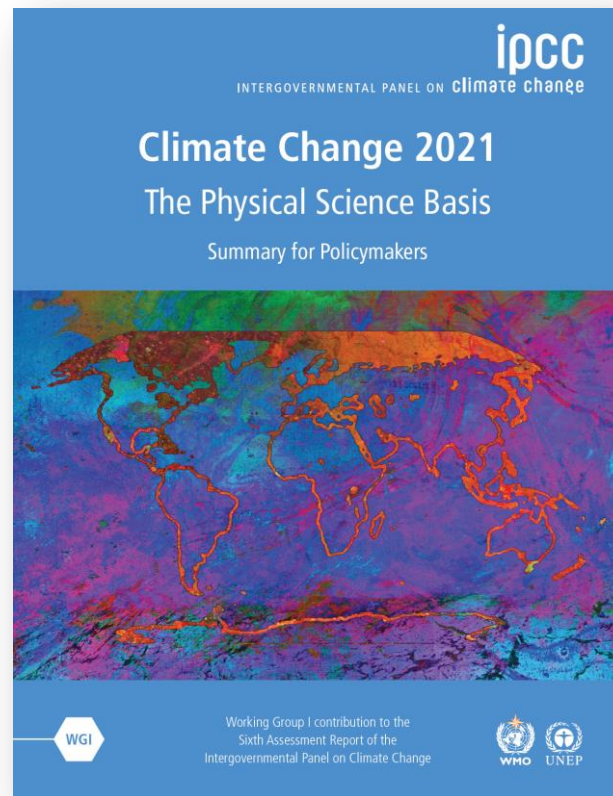
✓ Что нас ожидает?

✓ Что нужно делать?

ipcc
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON
climate change



МГЭИК (Международная группа экспертов по изменениям климата)



РусГидро – Консорциум (ИФА РАН, ИГКЭ, МГУ) 2021-2024

НИР: Измерение выбросов парниковых газов (ПГ) и оценка поглощающей способности гидроэнергетических объектов

Актуальность:

Мир находится на пороге **4 энергоперехода**, когда тема зеленой энергетики становится все более актуальной. ГЭС в процессе производства энергии не используют ископаемого топлива, а только возобновляемые ресурсы в виде речного стока. **Для обоснования роли ГЭС, как наиболее низкоуглеродного источника энергии необходимо обоснование углеродной нейтральности и даже поглощающей способности водохранилищ ГЭС**

Цель:

Определение нето-баланса парниковых газов и поглощающей способности для характерных водохранилищ РФ энергетического назначения, **разработка и обоснование национальной методики** по определению баланса парниковых газов водохранилищ.



Результат:

Обоснование экологической безопасности ГЭС для российских и международных организаций и роли водохранилищ ГЭС в поглощении (выводе) парниковых газов из атмосферы.

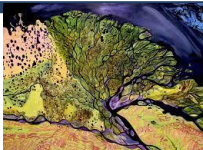
Водные экосистемы суши

Озера - 2.8 % площади суши, 4.2 млн км².
54% - озера площадью меньше 10 км²

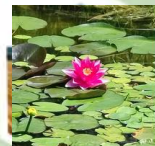
Болота - 2% площади суши, 3.5 млн км².
Южная Америка – 70%. Евразия – 18 %.
Россия – 8-20% территории

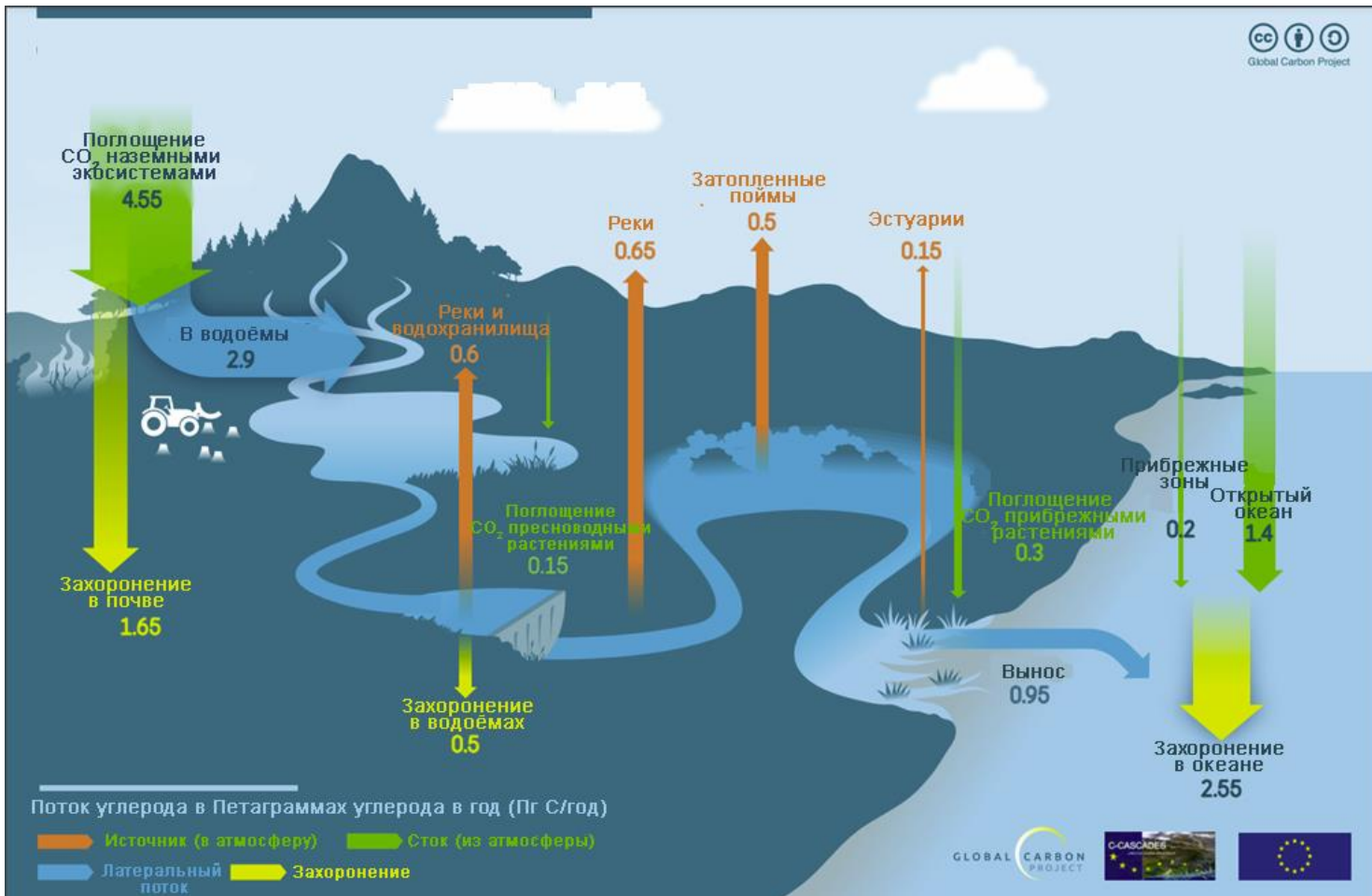
Реки - 773 тыс. км², 4 миллиарда рек

Эстуарии - несколько тысяч на планете



Водохранилища - 600 тыс км²,
60 тыс водохранилищ.
И каждый год появляется 300-500 новых





Водохранилища

Положительные факторы

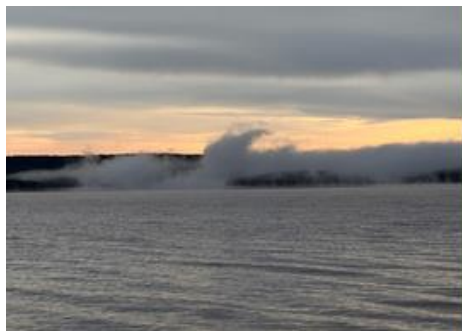
- ✓ Смягчение климата
- ✓ Водоснабжение
- ✓ Увеличение биоразнообразия
- ✓ Транспортная система
- ✓ Гидромелиорация
- ✓ Защита от наводнений
- ✓ Фильтрация воды
- ✓ Рыбное хозяйство
- ✓ Рекреация

Оказывают влияние на литосферу, гидросферу, атмосферу, биосферу



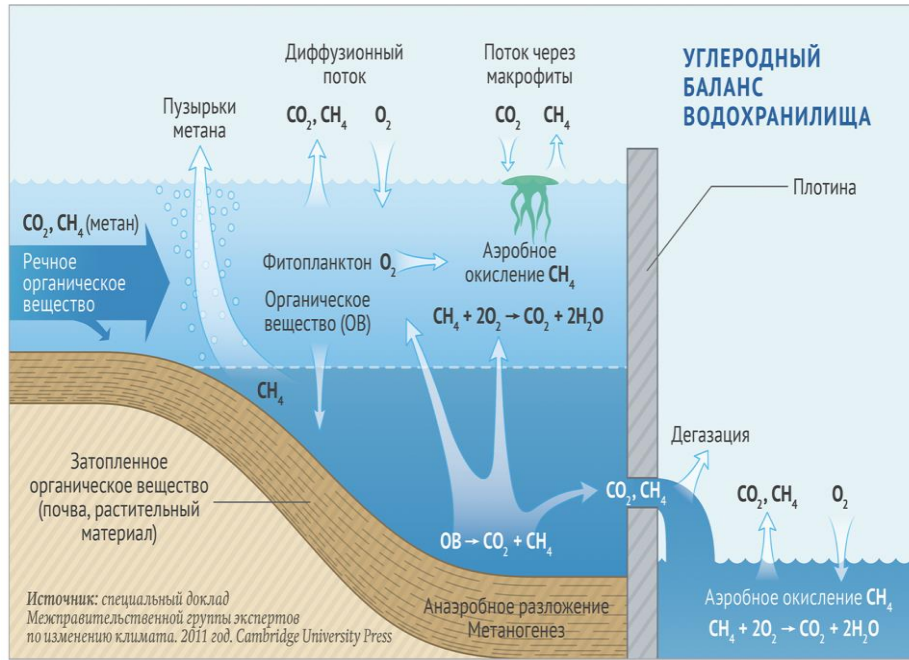
Отрицательные факторы

- Затопление хозяйственных и населенных земель
- Изменение ветрового режима и влажности
- Незамерзающая полынья нижнего бьефа
- Изменение видового состава животных и растительности
- Сейсмическая активность
- Нарушение баланса грунтовых вод



На территории Российской Федерации насчитывается 2290 средних и крупных водохранилищ, объемом более 1 млн м³ каждое, в т. ч. 103 — крупнейших (свыше 100 млн м³ каждое); кроме того около 30 000 мелких водохранилищ и прудов общим объемом более 800 км³





Прямые выбросы углекислого газа от ГЭС отсутствуют, так как отсутствует необходимость сжигать топливо, а источником энергии служит вода. Вклад в эмиссию парниковых газов (углекислый газ (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O)) может вносить водохранилище ГЭС.

Главный вклад – метан.

Углекислый газ – приходит с водосбора. То есть эмиссия существовала и до строительства водохранилища

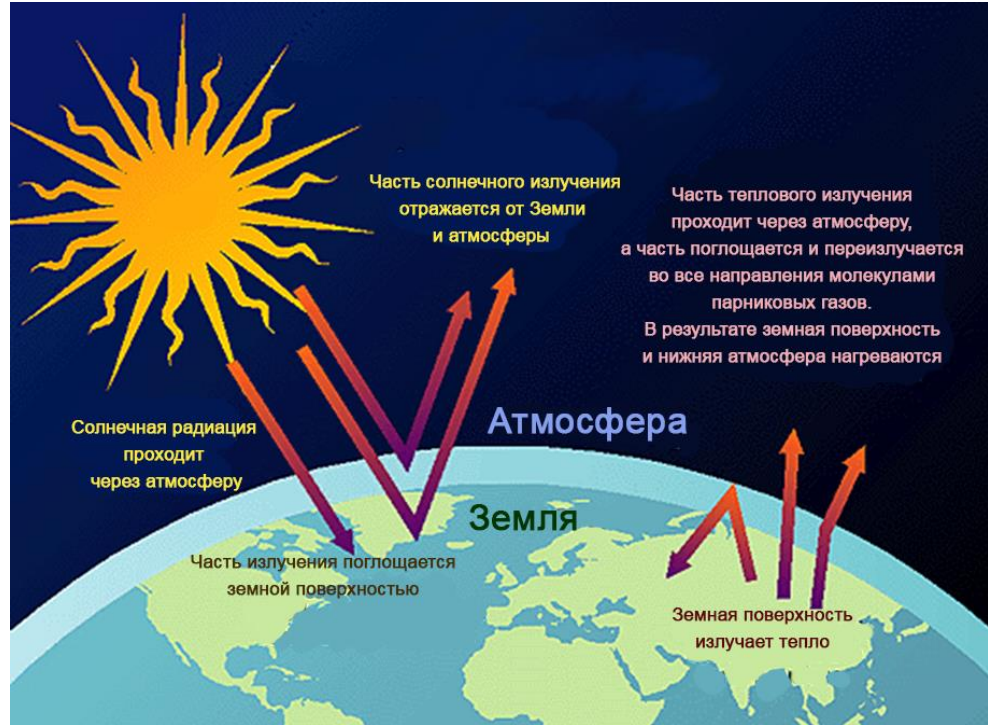
Закись азота – эмиссии малы и связаны с антропогенной деятельностью.

Эмиссия метана определяется:

- Поступлением метана из донных отложений
- Продукцией метана в воде водоема
- Притоком с водосбора (с природными и сточными водами),
- Расходом на окисление в водной толще и сброс в нижний бьеф (при дегазации воды, сбрасываемой через плотину).

Разница толщины донных отложений во впадающей реке и в водохранилище позволяет оценить осаждение твёрдой органики на дно объекта за время его существования. Таким образом получается поглощающая способность водохранилища в терминах взвешенного углерода, который в отсутствие водохранилища был бы выведен в атмосферу в форме углекислого газа.

Парниковый эффект



Почему метан?

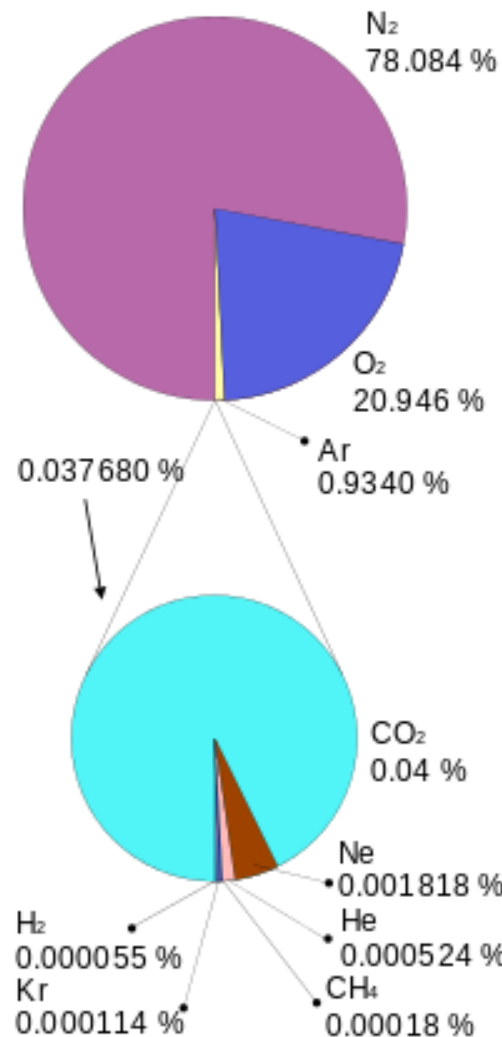
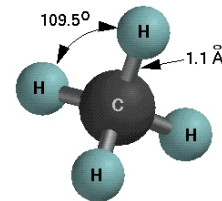
Метан интенсивно поглощает тепловое излучение Земли в инфракрасной области спектра на длине волны 7,66 мкм.

Вклад различных газов в парниковый эффект

Газ	H ₂ O	CO ₂	O ₃	N ₂ O	CH ₄
Вклад в парниковый эффект, °C	20,6	7,2	2,4	1,4	0,8

Метан в 28 раз сильнее поглощает тепловую радиацию, чем углекислый газ. 1% прироста содержания метана дает вклад примерно в 25-28 раз более высокий, чем последствия от увеличения содержания углекислого газа на 1%.

CO₂-эквивалент: условная единица, используемая для сравнения выбросов различных парниковых газов на основе их потенциала глобального потепления (обычно — на временном горизонте 100 лет) путем преобразования количества других газов в эквивалентное количество диоксида углерода с таким же потенциалом глобального потепления.



Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources

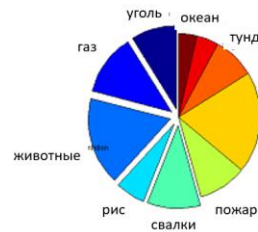
[Judith A. Rosentreter](#) , [Alberto V. Borges](#), [Bridget R. Deemer](#), [Meredith A. Holgerson](#), [Shaoda Liu](#), [Chunlin Song](#), [John Melack](#), [Peter A. Raymond](#), [Carlos M. Duarte](#), [George H. Allen](#), [David Olefeldt](#), [Benjamin Poulter](#), [Tom I. Battin](#) & [Bradley D. Eyre](#)

Эмиссия метана

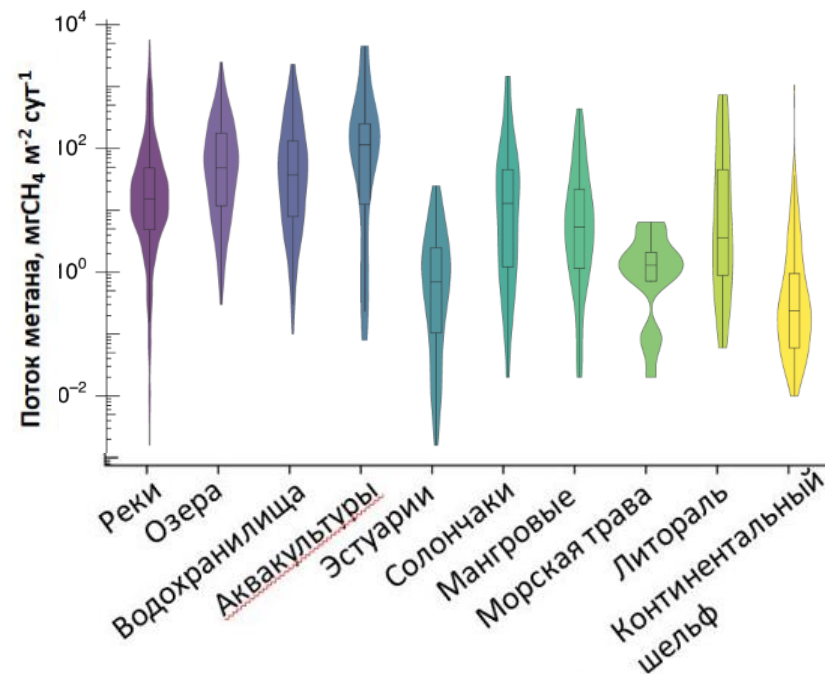
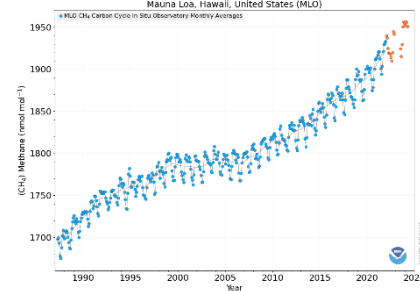
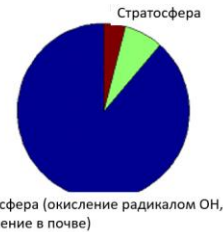
- **Болота** (138–165 Тг CH_4 /год)
- **озера** (23–142 Тг CH_4 /год)
- **Рисовые чеки** (25–32 Тг CH_4 /год),
- **водохранилища** (9–28 Тг CH_4 /год),
- **Прибрежные зоны** (5–28 Тг CH_4 /год, <200 m)
- **Реки** (2–21 Тг CH_4 /год).

1 Тг = 10^9 кг

Источники



Стоки



2008 г. – начало специального проекта Международной ассоциации гидроэнергетики (ИГА) и Международной гидрологической программы ЮНЕСКО по изучению роли водохранилищ в балансе парниковых газов



**Руководство по измерению выбросов
парниковых газов в пресноводных водоемах**

Полученный из:
Проект ЮНЕСКО/ИГА по исследованию выбросов парниковых газов из пресноводных водоемов

The carbon calculator for reservoirs

Assess, validate and report GHG emissions with the G-res Tool.

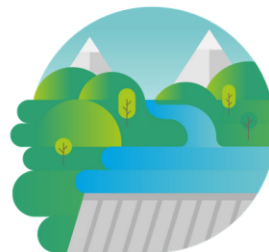


PRE-IMPOUNDMENT

Natural emissions

All ecosystems, including river systems, naturally emit greenhouse gases such as carbon dioxide and methane.

When a reservoir is created, there will be a change in GHG emissions which are dependent on local environmental conditions.



POST-IMPOUNDMENT

Net emissions

Greenhouse gases can be released when a reservoir is introduced due to the decomposition of organic material in the flooded area.

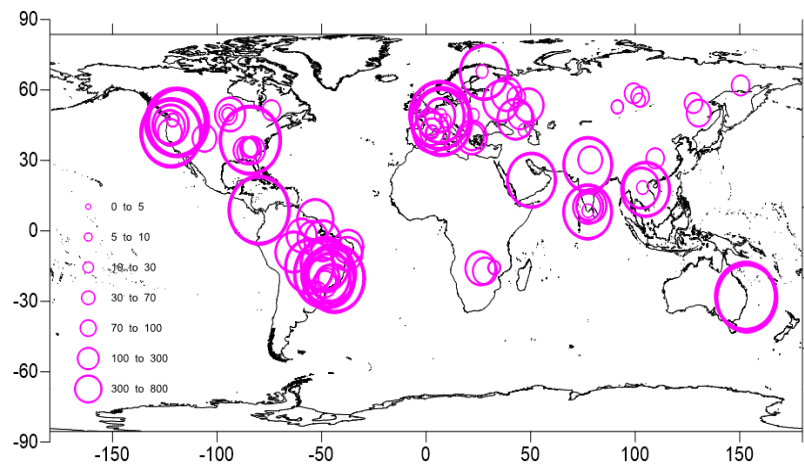
[READ MORE](#)



Коэффициенты выбросов CH_4 для водохранилищ старше 20 лет по МГЭИК (Международная группа экспертов по изменениям климата)

Угольные ТЭС (ГРЭС, ТЭЦ) — в зависимости от типа угля: $845\text{--}1020 \text{ г CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{ч.}$;

ГЭС — выбросы метана с водохранилищ в CO_2 эквиваленте: $100\text{--}700 \text{ г CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{ч.}$;

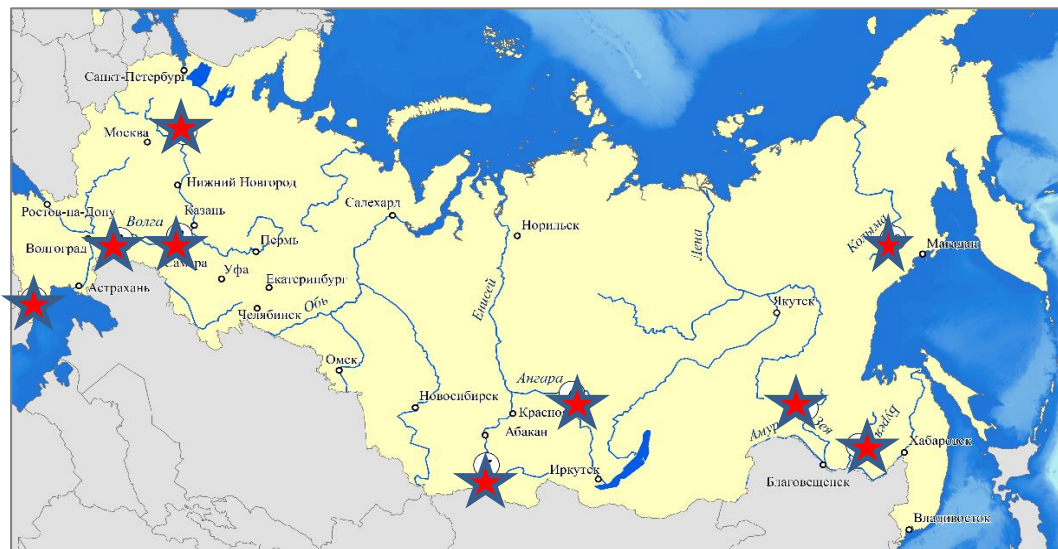


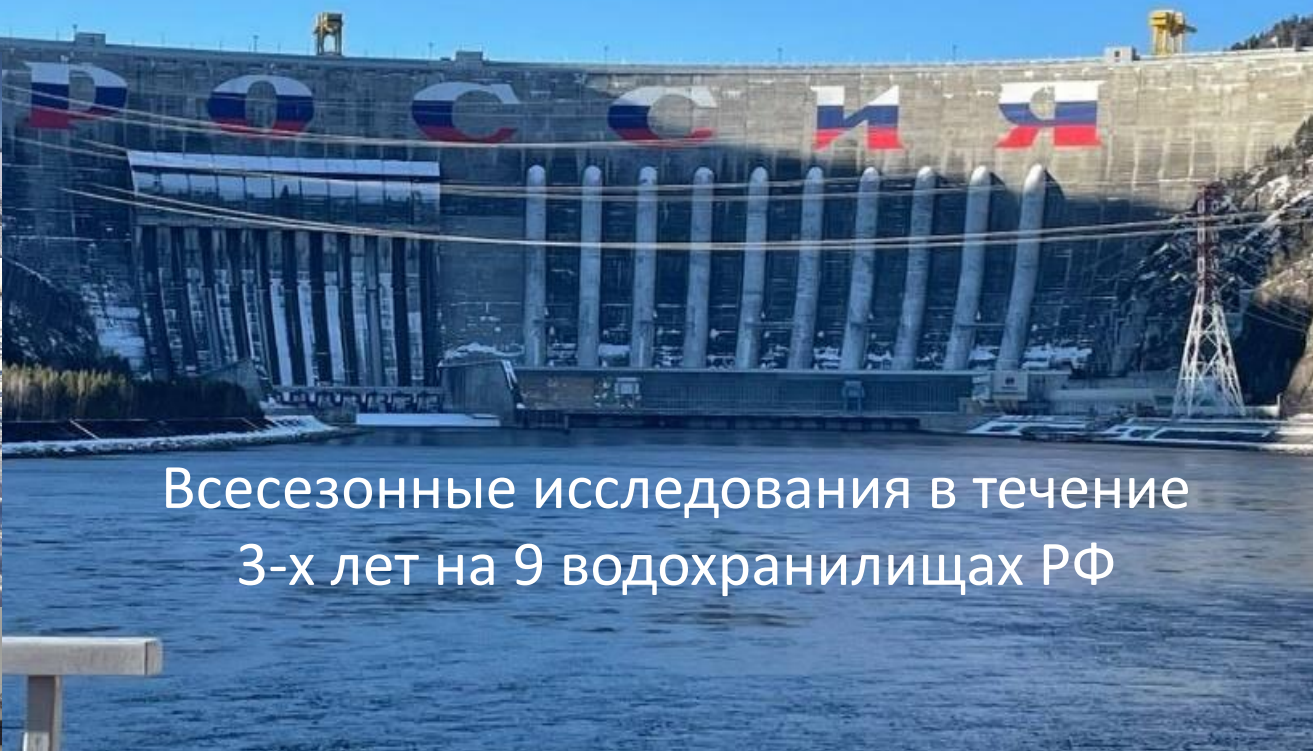
Климатическая зона		Коэффициенты выбросов CH ₄ возраст >20,j (кг CH ₄ га ⁻¹ год ⁻¹)		
	j	Среднее	Нижний и верхний предел 95% доверительного интервала среднего значения	N
Бореальный	1	13.6	7.3-19.9	96
Прохладный умеренны й	2	54.0	48.3-59.5	1879
Теплый умеренный / сухой	3	150.9	133.3-168.1	578
Теплый умеренный / влажный	4	80.3	74.0-86.0	1946
Тропический сухой / горный	5	283.7	261.9-305.8	710
Тропический влажный /	6	141.1	131.1-152.7	805

Водохранилище / Характеристика	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Рыбинское	Куйбышевское	Волгоградское	Чиркейское	Саяно- Шушенское	Богучанское	Зейское	Бурейское	Колымское
Период наполнения	1941—1947 гг.	1955-1957 гг.	1958-1960 гг.	1970-1974 гг.	1975-1990 гг.	2012-2015 гг.	1975-1985 гг.	2003-2008 гг.	1980-1994 гг.
Вид регулирования	Многолетнее	Сезонное	Сезонное	Многолетнее	Сезонное	Сезонное	Многолетнее	Сезонное	Многолетнее
Главная река	Волга	Волга	Волга	Сулак	Енисей	Ангара	Зея	Буря	Колыма
НПУ, м абс.	102,0	53,0	15,0	355,0	539,0	208,0	315,0	256,0	451,5
Площадь зеркала при НПУ, км ²	4550	6150	3117	42,4	608	2326	2420	740	441
Объем при НПУ, км ³	25,4	57,3	31,5	2,78	30,7	58,2	68,4	20,9	15,1
Глубина макс. при НПУ, м	30,4	41,0	41	140	220	74	100	125	121,5
Объем притока ср. годовой, км ³	31,4	264,5	260	5,55	47,3	80,7	24,7	27,49	14,7

Водохранилища в различных условиях:

- от субтропических до субполярных широт
- от умеренно-континентального до резко-континентального климата
- на равнинах и в горах
- в районах без многолетней мерзлоты и с ее развитием
- с различной степенью антропогенного воздействия
- самые «старые» эксплуатируются десятки лет, а самые «молодые» наполнены в последние 10-15 лет.





Всесезонные исследования в течение
3-х лет на 9 водохранилищах РФ



Решение задачи:

Измерительные кампании

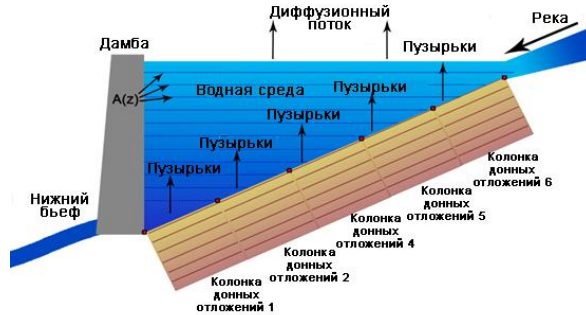


Математическое моделирование



Углеродный баланс водохранилища

- Профиль концентрации метана и углекислого газа в воде, концентрация метана в воздухе и донных отложениях
- Количество углерода в воде и донных отложениях: органический и неорганический, растворенный и нерастворенный
- Удельный поток метана и углекислого газа с поверхности
- Седиментация
- Содержание органического вещества в донных отложениях
- Профили температуры, электропроводности и содержания растворенного кислорода в воде
- Метеорологические параметры
- Гидрохимические параметры воды (содержание фосфора и т.д.)

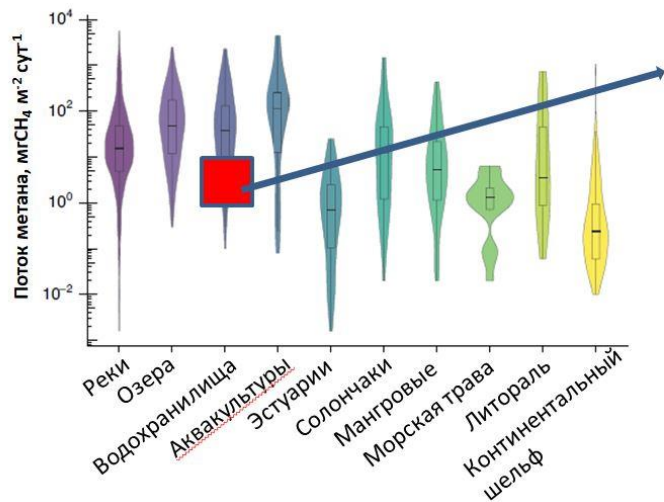


Биогеохимическая модель водоема + модель сбора углерода с водосбора реки



- Годовой ход эмиссии метана, эмиссии (поглощения) углекислого газа
- Годовой ход осаднения углерода в донные отложения
- Оценка весеннего выброса и дегазации через плотину
- Оценка эмиссии CO₂ с зоны осушки
- **Оценка годового баланса углерода водного объекта**

Результаты экспериментальных исследований



Rosentreter J. A. et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources //Nature Geoscience. 2021. V. 14. №. 4. P. 225-230

Экспериментальные исследования

Все сезоны

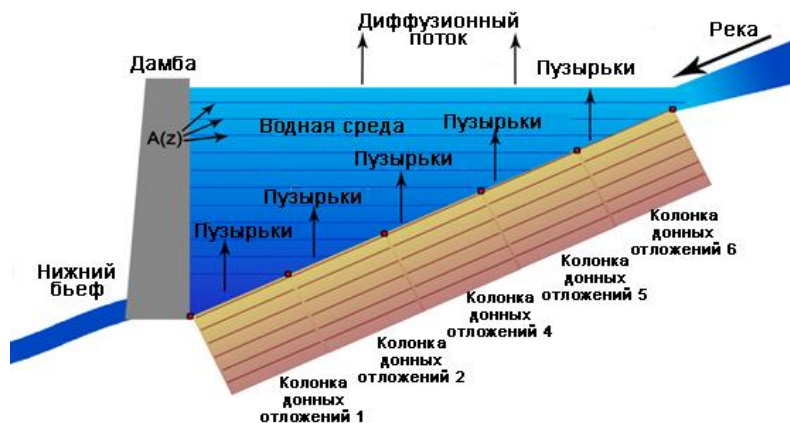
Экспертный подход с учетом:

- Районирования водоема
- Площади мелководий по модели рельефа
- Наличия и количества «горячих точек»
- Информации о работе гидроузла

Водохранилище	Средний удельный поток метана по данным наблюдений, $\text{mgCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$
Рыбинское	26.9
Бурейское	4.82
Волгоградское	8.56
Куйбышевское	15.0
Чиркейское	4.04
Зейское	4.91
Колымское	1.47
Богучанское	1.42
Саяно-Шушенское	3.67

Средний удельный поток метана от водохранилищ мира $180 \text{ mgCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ (по медиане: $26 \text{ mgCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$)

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ LAKE 3.0 – модифицирована для водохранилищ



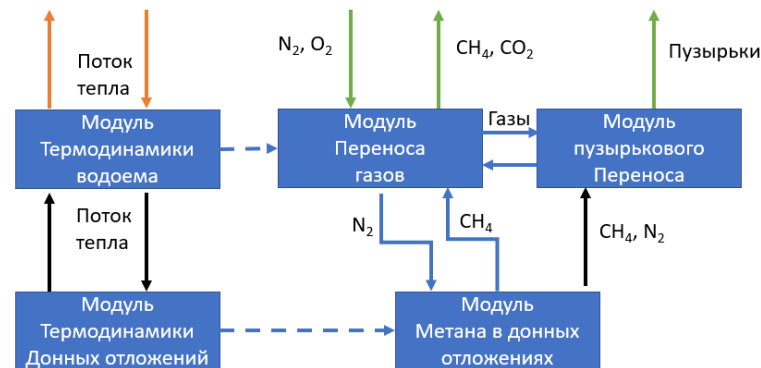
LAKE позволяет рассчитывать потоки газов:

- диффузионный поток с поверхности водоема
- пузырьковые потоки, рассчитываемые отдельно над слоями донных отложений
- поток через вытекающий водоток (турбины в случае гидроэлектростанций).

В отличие от используемой в мире для оценок углеродной роли водохранилищ модели G-Res основана на расчете реальных физических и химических процессов, а не использовании эмпирических коэффициентов

LAKE - одномерная модель пограничного слоя, разработана для моделирования гидрологических, термодинамических и биохимических процессов в озерах и водохранилищах. Модель учитывает следующие процессы:

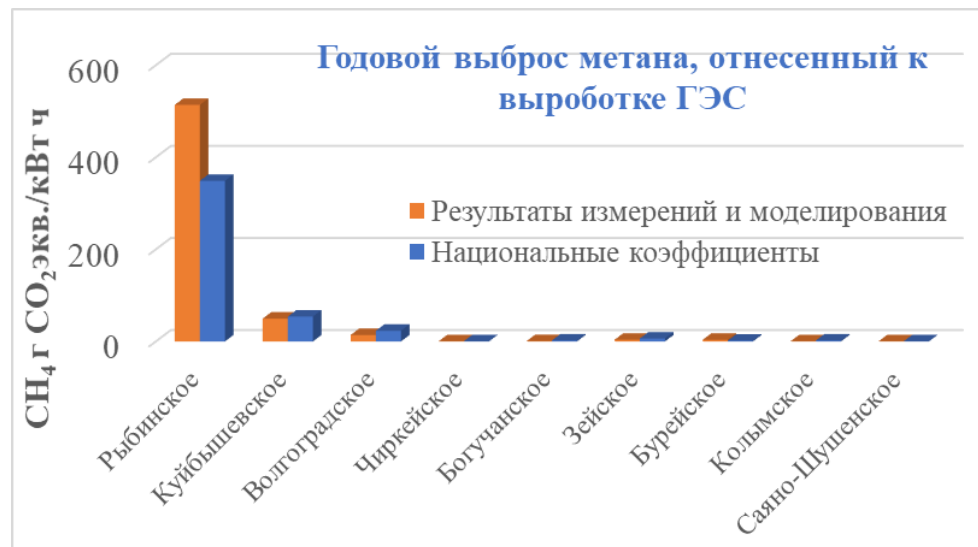
- фотосинтез, дыхание, выделение и отмирание фито- и зоопланктона
- аэробное разложение растворённых органических соединений и детрита
- фотохимическое разложение растворённых органических соединений
- аэробное окисление метана



IPCC (МГЭИК – Международная группа экспертов по изменению климата). Рекомендации по расчету эмиссий метана с водохранилищ различных зон (МГЭИК 2006, 2019) и полученные по результатам измерений и моделирования национальные коэффициенты для бореальной и умеренной зон.

Средние национальные коэффициенты – меньше, чем рекомендованные МГЭИК.

Зона	Коэффициент, кг CH ₄ /га	Нижний и верхний предел 95% доверительного интервала среднего значения	Коэффициент МГЭИК 2019, кг CH ₄ /га	Нижний и верхний предел 95% доверительного интервала среднего значения
Среднее для бореальной зоны	5,6	1,3-9,9	13,6	7,3-19,9
Среднее для прохладной умеренной влажной зоны	33,2	16,4-50,0	54,0	48,3-59,5

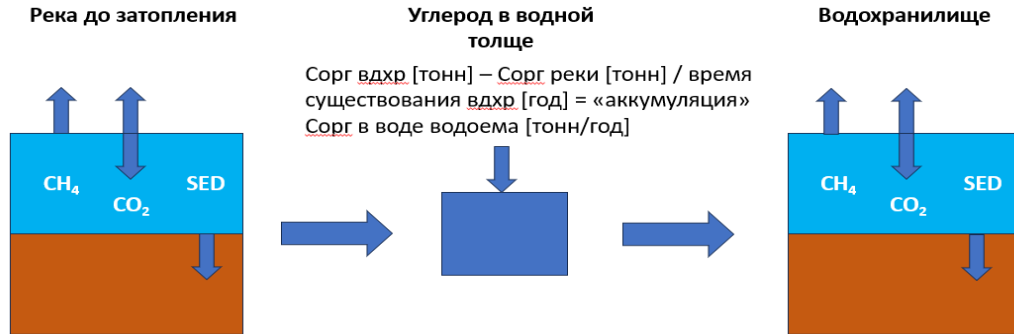


Данные МЭА, 2019 г.

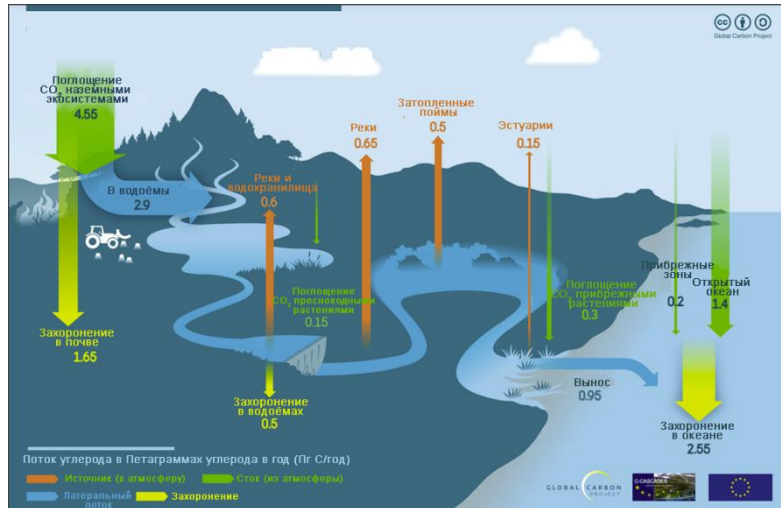
Угольные ТЭС (ГРЭС, ТЭЦ) — в зависимости от типа угля: 845–1020 г CO₂/кВт·ч. ;
 ТЭС на природном газе — 620 г CO₂/кВт·ч ;
 Ветровые электростанции – 14 г CO₂/кВт·ч;
 АЭС — 8 г CO₂/кВт·ч

Все исследованные водохранилища кроме Рыбинского (старое непроточное, неглубокое водохранилище. Небольшая мощность ГЭС на большую площадь зеркала) выделяют метана в CO₂ эквиваленте на производство 1 кВт энергии на порядок и более ниже, чем при сжигании ископаемого топлива

Схема баланса парниковых газов в водохранилище.



Разница толщины донных отложений во впадающей реке и в водохранилище позволяет оценить осаждение твёрдой органики на дно объекта за время его существования. Таким образом получается поглощающая способность водохранилища в терминах взвешенного углерода, который в отсутствие водохранилища был бы выведен в атмосферу в форме углекислого газа.



Результат - антропогенный вклад в экосистему водохранилища, CO_2 -экв. $\text{кг}/\text{м}^2/\text{год}$

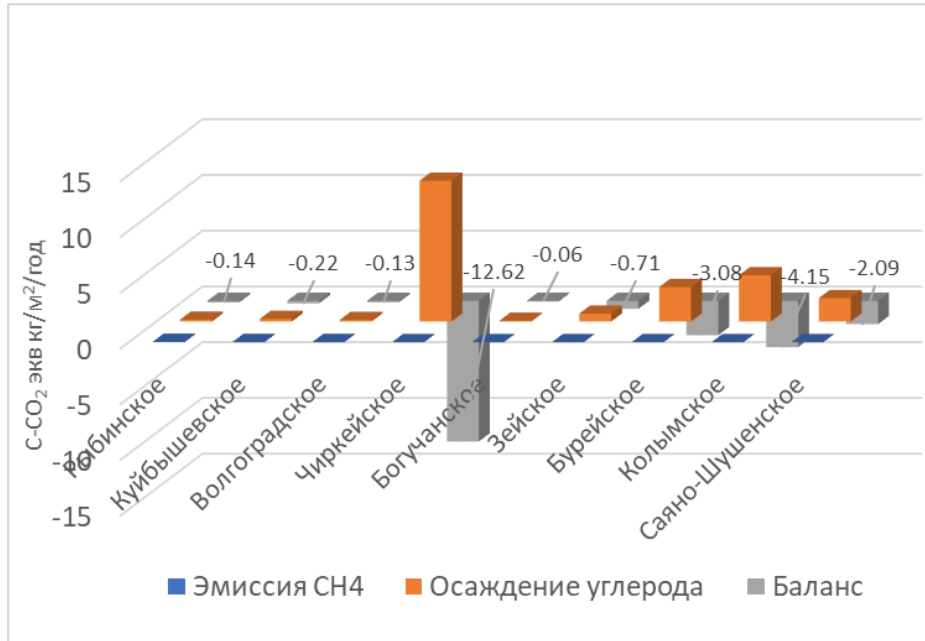
Составляющие:

Антропогенная эмиссия CH_4 , CO_2 -экв. $\text{кг}/\text{м}^2/\text{год}$

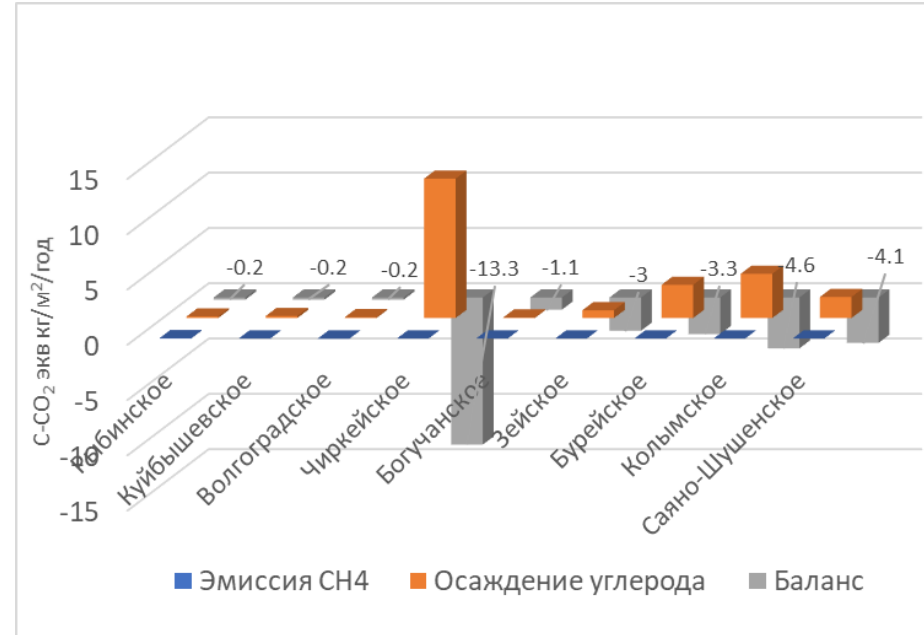
Антропогенное осаждение углерода, CO_2 $\text{кг}/\text{м}^2/\text{год}$

Содержание антропогенного углерода в воде водохранилища, $\text{кг CO}_2/\text{м}^2$

Общий баланс в водохранилище (естественные и антропогенные условия)



Результаты расчётов антропогенных составляющих баланса парниковых газов рассчитанных на основе разницы между балансом в реке и в водохранилище



Поглощение (осаждение) углерода в водохранилище больше, чем его эмиссия в атмосферу

Водохранилище	Суммарный годовой выброс CH ₄ от водохранилищ, тыс. тонн C-CO ₂ экв./ год	Эмиссия CH ₄ г C-CO ₂ экв./кВт ч	Накопление Сорг в ДО C-CO ₂ тыс. т/год	Поглощение г C-CO ₂ экв./кВт ч	Нетто- поглощение C-CO ₂ тыс. т/год	Нетто- поглощение г C-CO ₂ экв./кВт ч
Рыбинское	185.20	156.95	788.3	668.1	603.1	511.2
Куйбышевское	156.13	15.17	2288.0	350.4	2131.9	335.2
Волгоградское	52.15	4.29	440.0	36.2	387.9	31.9
Чиркейское	0.33	0.13	1492.3	145.0	1492.0	144.9
Богучанское	4.84	0.27	535.3	216.7	530.5	216.4
Зейское	6.85	1.17	1719.7	294.0	1712.9	292.8
Бурейское	7.08	1.08	1012.0	304.4	1004.9	303.3
Колымское	0.55	0.17	155.5	8.8	155.0	8.6
Саяно- Шушенское	2.99	0.13	1276.0	55.2	1273.0	55.1

Все исследуемые водохранилища являются поглотителями углерода, то есть выводят углекислый газ из атмосферы!!!

1. Выполнен расчет баланса выбросов и поглощения ПГ, в том числе, по трем уровням сложности согласно МГЭИК.
2. Разработана расчетная методика по оценке выбросов ПГ и оценке поглощающей способности водохранилищ с использованием результатов проведенных исследований и математического моделирования. Получены национальные пересчетные коэффициенты для двух зон - бореальной и прохладной умеренной влажной зоны.
3. Исследуемые водохранилища составляют около 30% площади всех водохранилищ РФ. Полученные национальные пересчетные коэффициенты, в отличие от коэффициентов МГЭИК 2019, учитывают территориально-географические особенности страны, а также конкретные свойства отдельных водохранилищ (размер, глубину, их трофический статус, осаждение и улавливание углерода, относительное расположение водозаборов, и другие факторы.
4. Оценки баланса ПГ показывают, что водохранилища являются нетто-поглотителями, и антропогенная составляющая не приводит к существенному увеличению выбросов парниковых газов

- **Цель проекта:** Разработать национальную систему мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах Российской Федерации.

Вопросы?

1. Роль водохранилищ неэнергетического значения, небольших размеров, небольшого возраста, других климатических зон?
2. Роль водохранилищ в балансе углекислого газа? (эмиссии с зоны осушки и пр.)
3. Роль весеннего и осеннего выбросов?

Решение: Измерения, Моделирование, Данные дистанционного зондирования

Спасибо

