



РИТМ
углерода



**УГЛЕРОД В НАЗЕМНЫХ
ЭКОСИСТЕМАХ: МОНИТОРИНГ**
РЕАЛИЗАЦИЯ ВИП ГЗ «ЕДИНАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ
СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИ
АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ – 2023»

ОЦЕНКА ЛАТЕРАЛЬНЫХ ПОТОКОВ УГЛЕРОДА. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Прокушкин Анатолий Станиславович

к.б.н., вед. науч. сотр., Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ЦЭПЛ РАН

Рабочая группа:

Лукина Юлия Николаевна (ИВПС КарНЦ РАН)

Максимов Трофим Христофорович (ИБПК СО РАН)

Репина Ирина Анатольевна (ИФА РАН)

Кожевникова Надежда Константиновна (ФНЦ Биоразнообразие ДВО РАН)

Заров Евгений Андреевич (ЮГУ)

Копысов Сергей Геннадьевич (ИМКЭС СО РАН)

Чалов Сергей Романович (МГУ)

13 февраля 2024, ЦЭПЛ РАН, Москва

Цель и задачи

- Цель - организация сети инструментального мониторинга латеральных потоков углерода на территории Российской Федерации

Задачи:

1 этап

- 1) Определить размещение постов мониторинга на территории страны для осуществления пилотных исследований в 2024 г.;
- 2) Разработать общую методологию опробывания, пробоподготовки и измерений в полевых и лабораторных условиях.

2 этап

Проведение пилотных исследований (количественного определения) компонентов латерального стока углерода на постах мониторинга

3 этап

Сравнительный анализ результатов и выработка **рекомендаций** для осуществления мониторинга латерального стока углерода на территории Российской Федерации

Формы углерода в водных экосистемах

- Растворенный органический углерод (сложная смесь органических молекул специфической и индивидуальной природы) **(DOC/POУ)**
- Взвешенный органический углерод (растительные остатки и почвенное органическое вещество) **(POC/BOУ)**
- Растворенный неорганический углерод (pH-зависимое соотношение CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-}) **(DIC/PНУ)**
- Метан

ЭМИССИЯ с водной поверхности (CO_2 , CH_4 , N_2O)

Ретроспектива

- архивные данные Росгидромета

Латеральный сток

- Химическое потребление кислорода (ХПК)
~ органическое вещество ($\text{ТОС} = \text{ДОС} + \text{РОС}$)

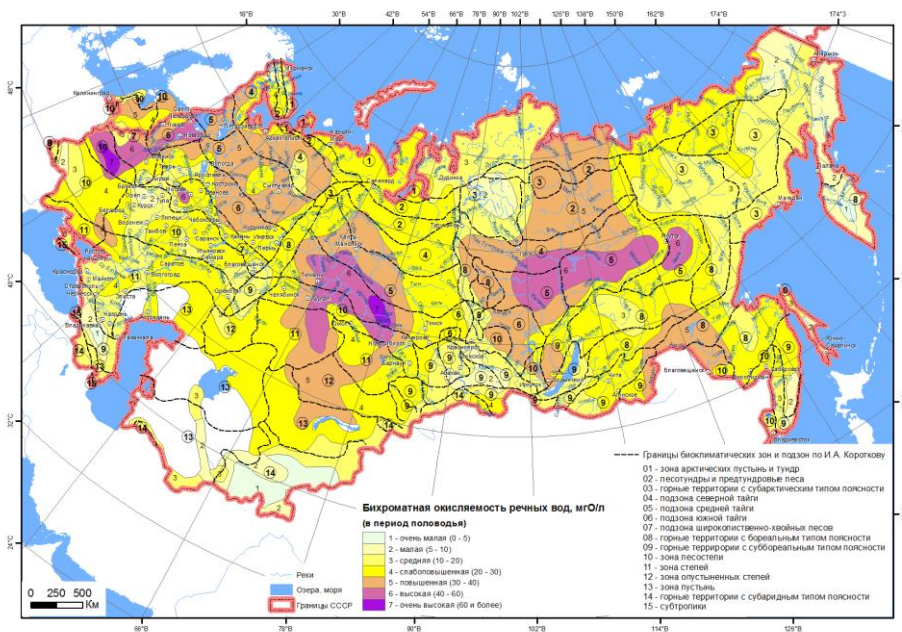
- щелочность ~ бикарбонат-ион
(неорганический углерод (IC))

- ВЗВЕСИ

Архивные гидрохимические материалы: химическое потребление кислорода (ХПК) перманганатная и бихроматная окисляемость

С 1930-х годов

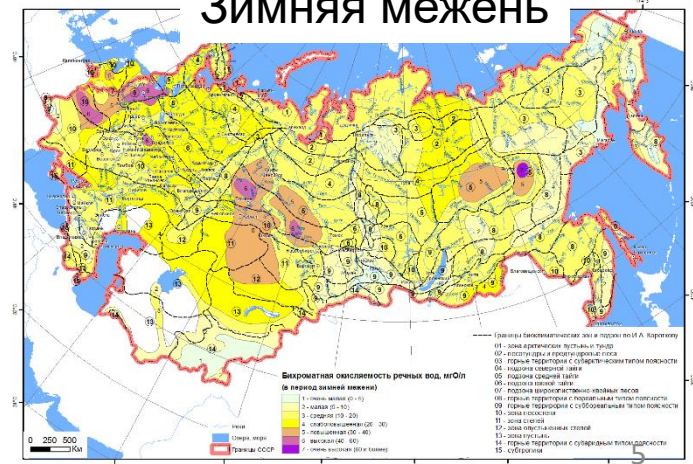
Весеннее половодье



Летняя межень



Зимняя межень



Maltseva A.V., Tarasov M.N., Smirnov M.P. Export of organic matter from the territory of the USSR (Stok organicheskikh veschestv s territorii SSSR). Gydrometeoizdat. Leningrad. 1987. (Gidrokhimicheskie materialy. Vol. 102) 118 P.

- Romankevich, E. A. and Vetrov, A. A.: Carbon cycle in Arctic seas of Russia, Nauka, Moscow, Russia, 302 pp., 2001 (in Russian).
- Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V A reassessment of the Russian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean. American Journal of Science. 1996. Vol. 296. P. 664-691
- Gordeev V.V. and Kravchishina Marina D.M. River flux of dissolved organic carbon (DOC) and particulate organic carbon (POC) to the Arctic Ocean: what are the consequences of the global changes? In Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions, J.C.J. Nihoul and A.G. Kostianoy (eds.), Springer Science + Business Media B.V. 2009. P. 145-160.
- McGuire D., Hayes D.J., Kicklighter D.W., Manizza M., Zhuang Q., Chen M., Follows M.J., Gurney K.R., McClelland J.W., Melillo J.M., Peterson B.J., Prinn R.G. An analysis of the carbon balance of the Arctic Basin from 1997 to 2006. Tellus. 2010. 62B. P. 455–474**
- Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., van der Molen M.K., Belelli Marchesini L., Maximov T. C., Maksyutov S., Schulze E.-D. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods. Biogeosciences. 2012. 9. P. 5323–5340, doi:10.5194/bg-9-5323-2012**
- McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D.J., Heimann M., Lorenson T.D., MacDonald R.W., Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change. Ecological Monographs. 2009. 79(4). P. 523–555**

Величины стока общего органического углерода

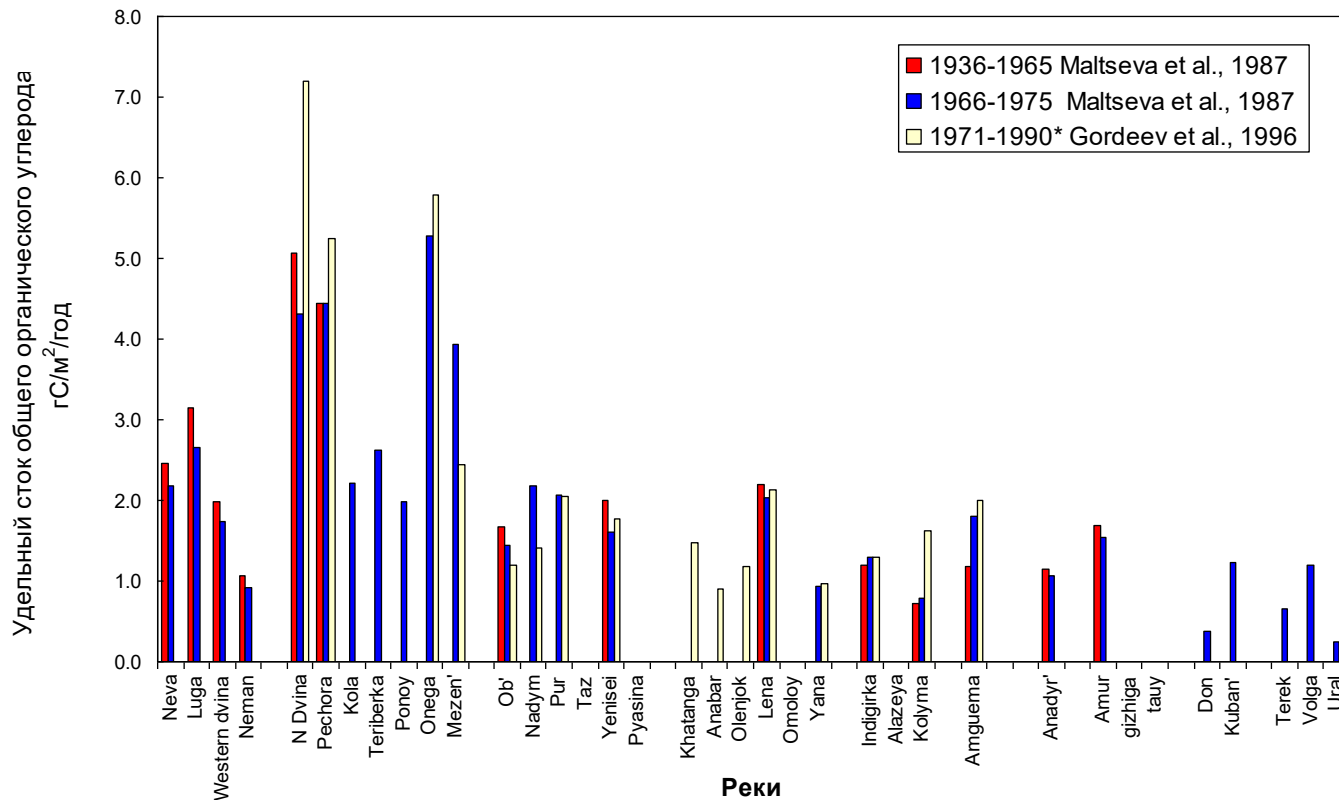
Maltseva et al. (1987)

1936-1966 - 24.7 TgC год⁻¹ (19 рек)

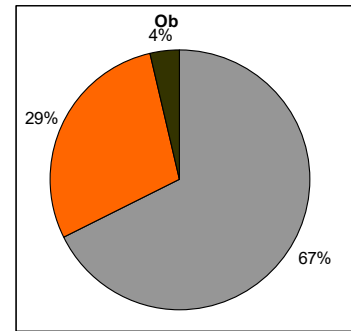
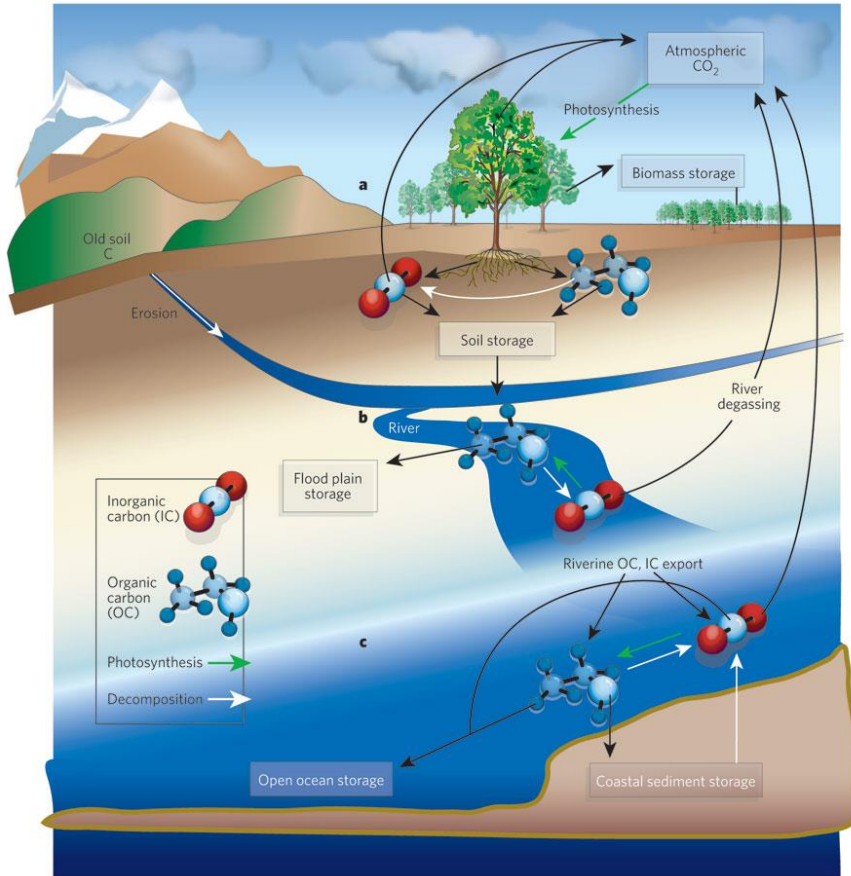
1966-1975 - 23.4 TgC год⁻¹ (32 реки)

Gordeev et al. (1996)

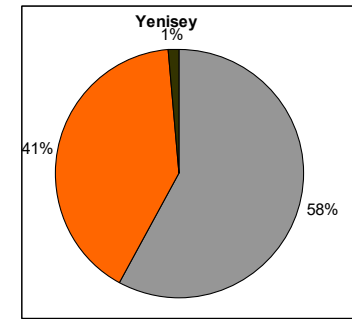
1985-1990: 20.8 Tg C год⁻¹ (16 рек СЛО)



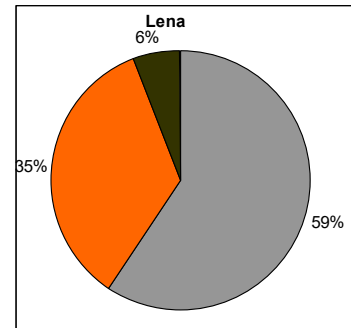
Сток углерода в конечный водоем стока



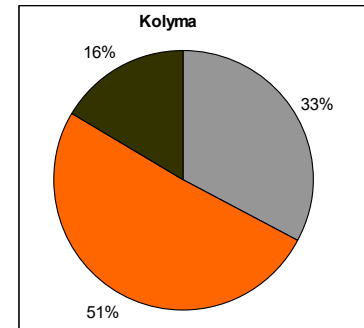
9.9 ТгС/год



12.8 ТгС/год



9.9 ТгС/год



2.3 ТгС/год

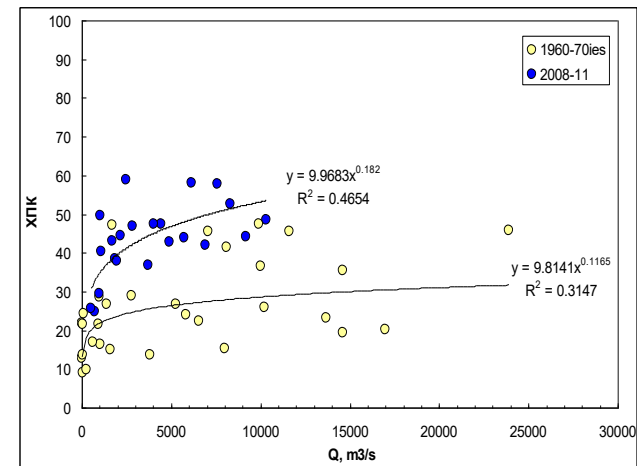
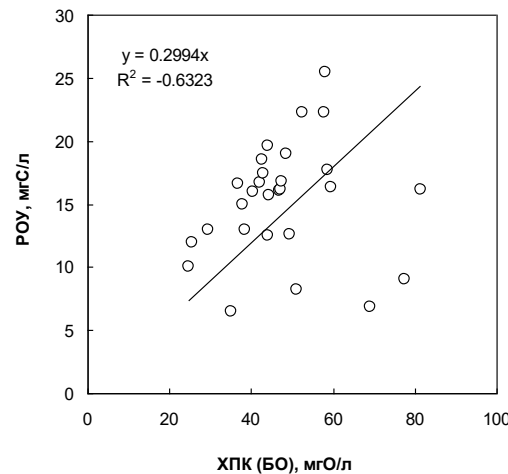
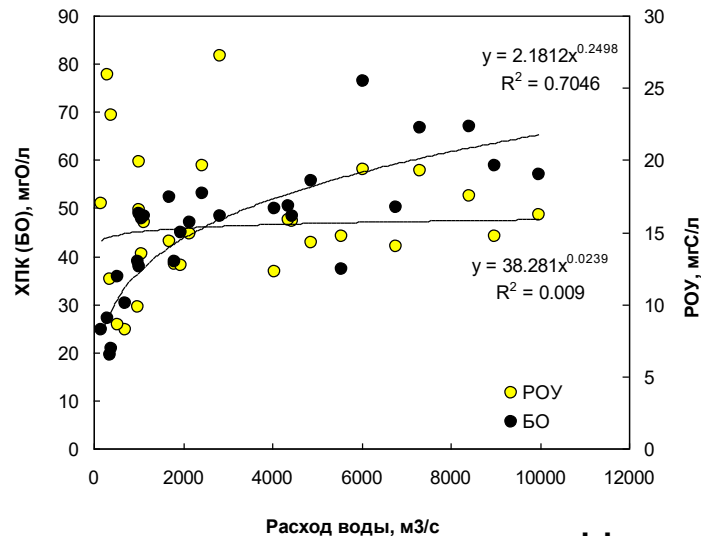
Peter A. Raymond, Nature 436, 469-470 (2005)

Суммарный вынос - 56.4 ТгС год⁻¹

Dolman et al., 2012

Проблемы мониторинга в системе Росгидромета

- Низкая частота (компенсируется длительностью ряда)
- Отсутствие фильтрации = общий органический углерод (ТОС)
- Сроки хранения образцов = потеря «биологически» доступного С
- Использование бихроматной окисляемости...

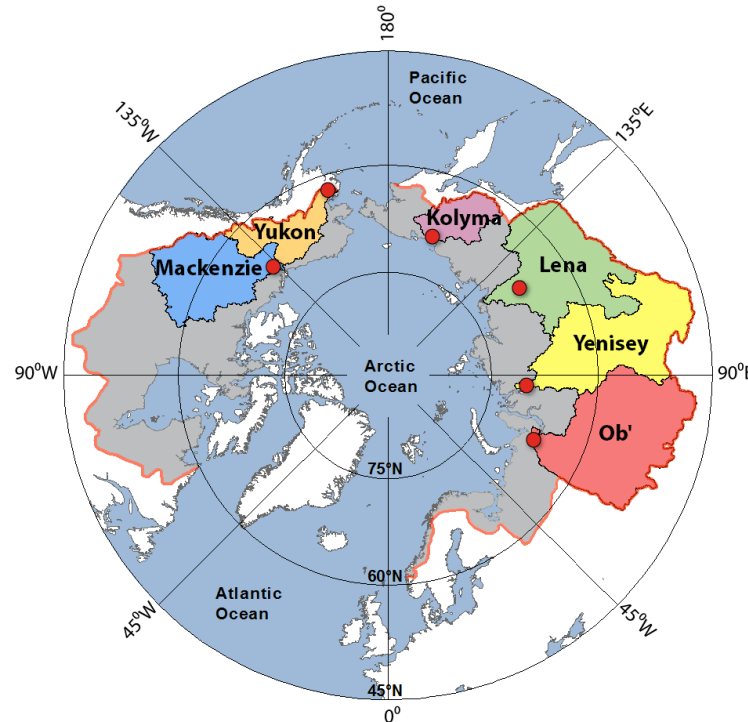


р. Нижняя Тунгуска – гидропост Тура

Сравнение величин Росгидромета и ИЛ СО РАН

Программы PARTNERS и Arctic-GRO

<https://arcticgreatrivers.org/>

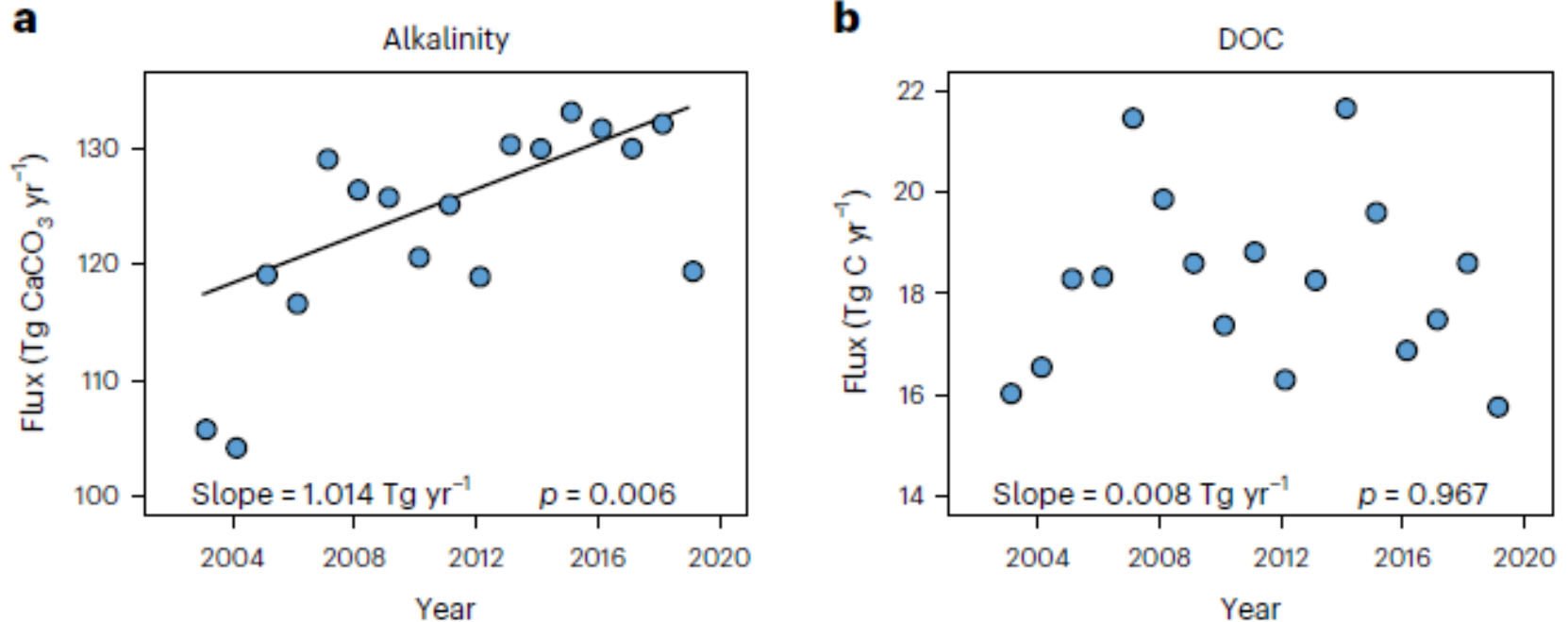


Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J., Tank S.E., Bulygina E., Eglinton T.I., Gordeev V.V., Gurtovaya T.Y., Raymond P.A., Repeta D.J., Staples R., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A. Seasonal and Annual Fluxes of Nutrients and Organic Matter from Large Rivers to the Arctic Ocean and Surrounding Seas. *Estuaries and Coasts*. 2012. 35. P. 369–382 DOI 10.1007/s12237-011-9386-6

Amon R.M.W., Rinehart A.J., Duan S., Louchouart P., Prokushkin A., Guggenberger G., Bauch D., Stedmon C., Raymond P.A., Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J., Walker S.A., Zhulidov A.V. Dissolved organic matter sources in large Arctic rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012. 94. P. 217–237.


Tank, S. E., McClelland, J. W., Spencer, R. G. M., Shiklomanov, A. I., Suslova, A., Moatar, F., Amon, R. M. W., Cooper, L. W., Elias, G., Gordeev, V. V., Guay, C., Gurtovaya, T. Yu., Kosmenko, L. S., Mutter, E. A., Peterson, B. J., Peucker-Ehrenbrink, B., Raymond, P. A., Schuster, P. F., Scott, L., ... Holmes, R. M. (2023). Recent trends in the chemistry of major northern rivers signal widespread Arctic change. *Nature Geoscience*. 2023. 16. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01247-7>

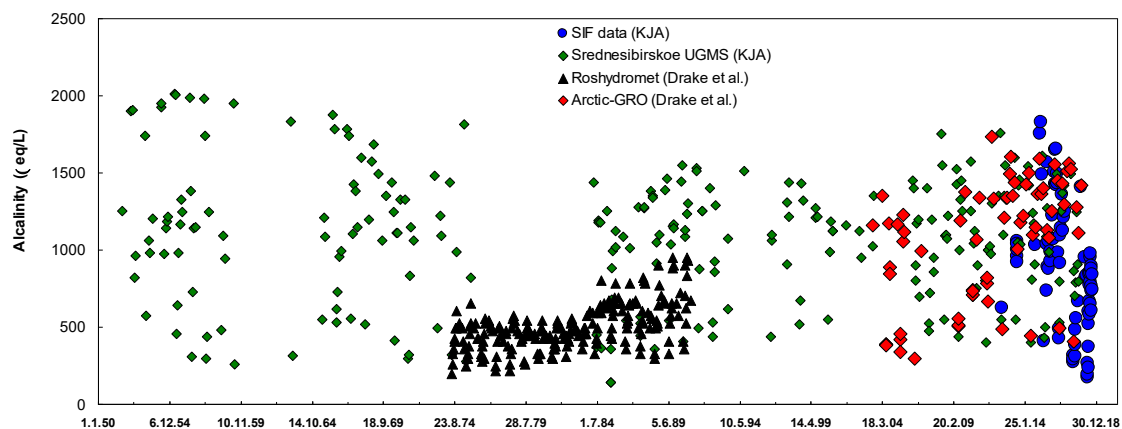
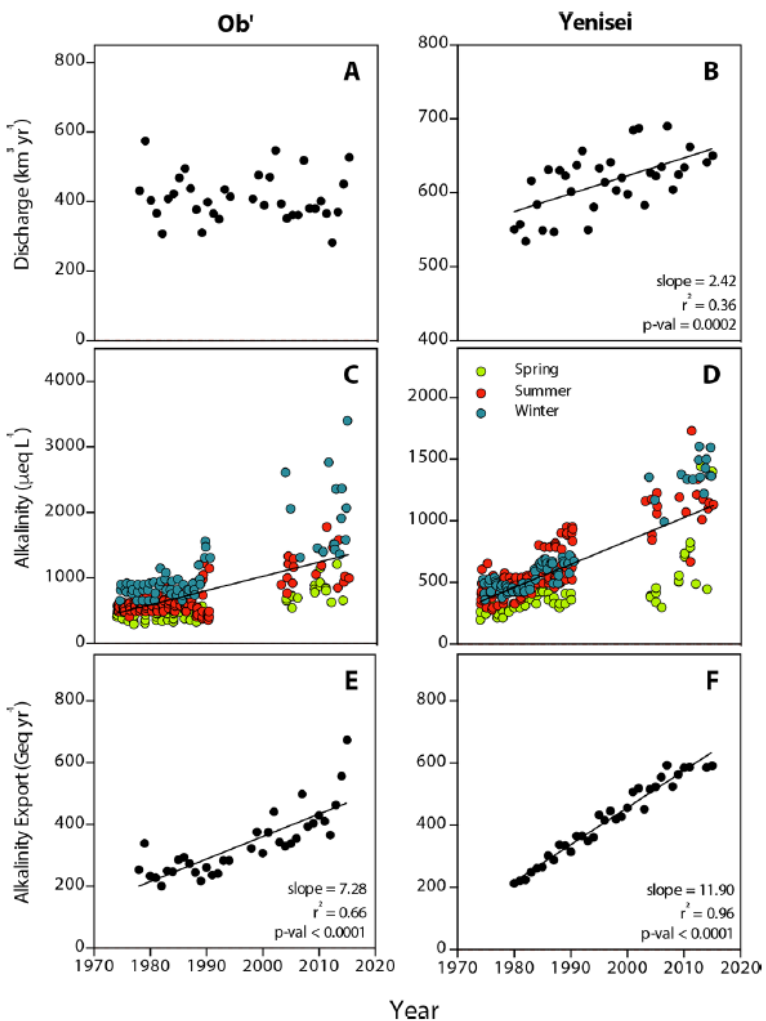
Обобщенные результаты для 6 рек СЛО (Обь, Енисей, Лена, Колыма, Юкон, Маккензи)



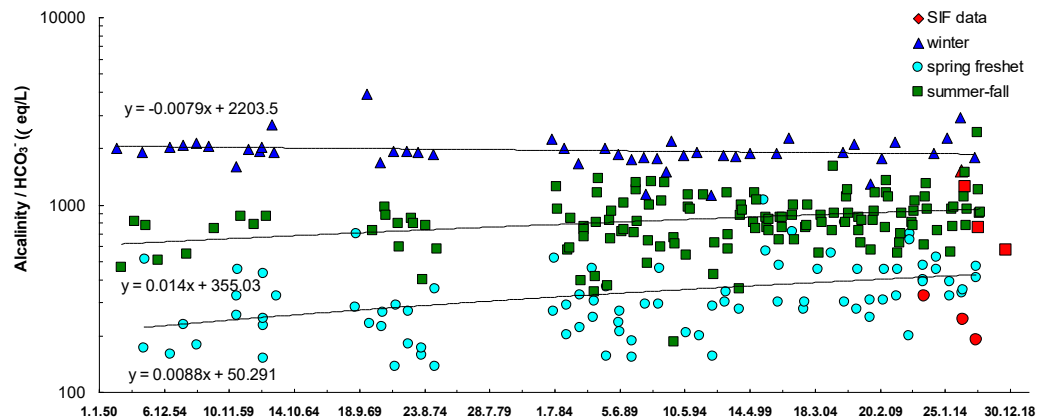
Tank, S. E., McClelland, J. W., Spencer, R. G. M., Shiklomanov, A. I., Suslova, A., Moatar, F., Amon, R. M. W., Cooper, L. W., Elias, G., Gordeev, V. V., Guay, C., Gurtovaya, T. Yu., Kosmenko, L. S., Mutter, E. A., Peterson, B. J., Peucker-Ehrenbrink, B., Raymond, P. A., Schuster, P. F., Scott, L., ... Holmes, R. M. (2023). Recent trends in the chemistry of major northern rivers signal widespread Arctic change. *Nature Geoscience*. 2023. 16. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01247-7>

Increasing Alkalinity Export from Large Russian Arctic Rivers

Travis W. Drake,^{*,†}  Suzanne E. Tank,[‡] Alexander V. Zhulidov,[§] Robert M. Holmes,^{||}
 Tatiana Gurtovaya,[§] and Robert G. M. Spencer[†] *Environ. Sci. Technol.* 2018, 52, 8302–8308



Обобщенные данные по р. Енисей
 в замыкающем створе - Игарка

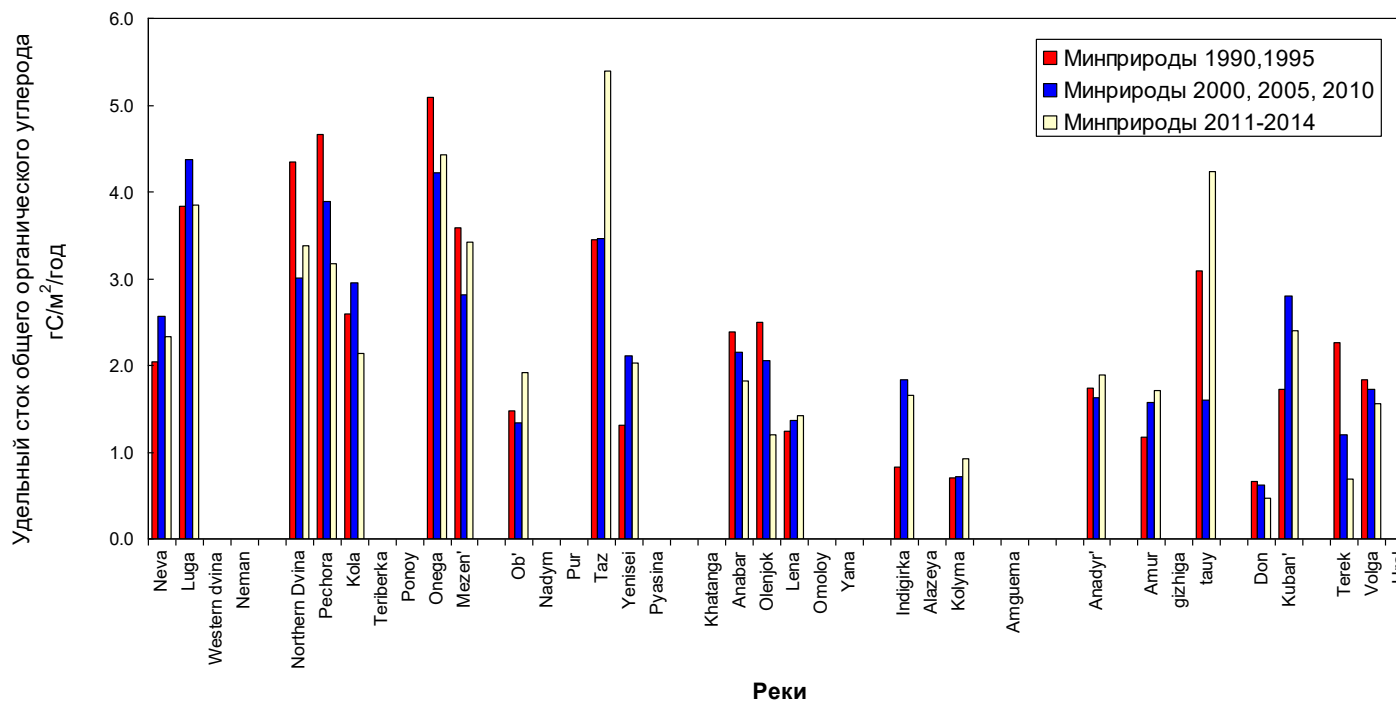


Сток органического углерода в 1990-2014 гг. (Таблица 26.4 из Приказа Минприроды №371)

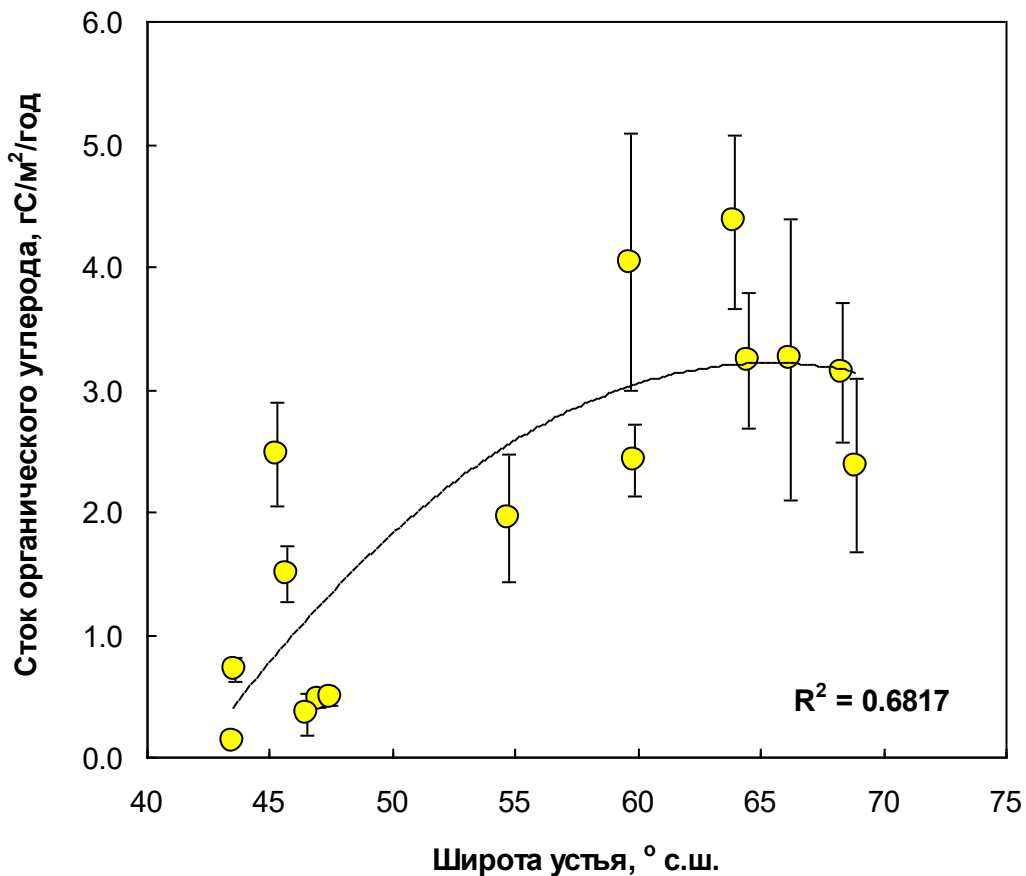
1990, 1995
20.9 ТгС год-1

2000, 2005, 2010
23.0 ТгС год-1

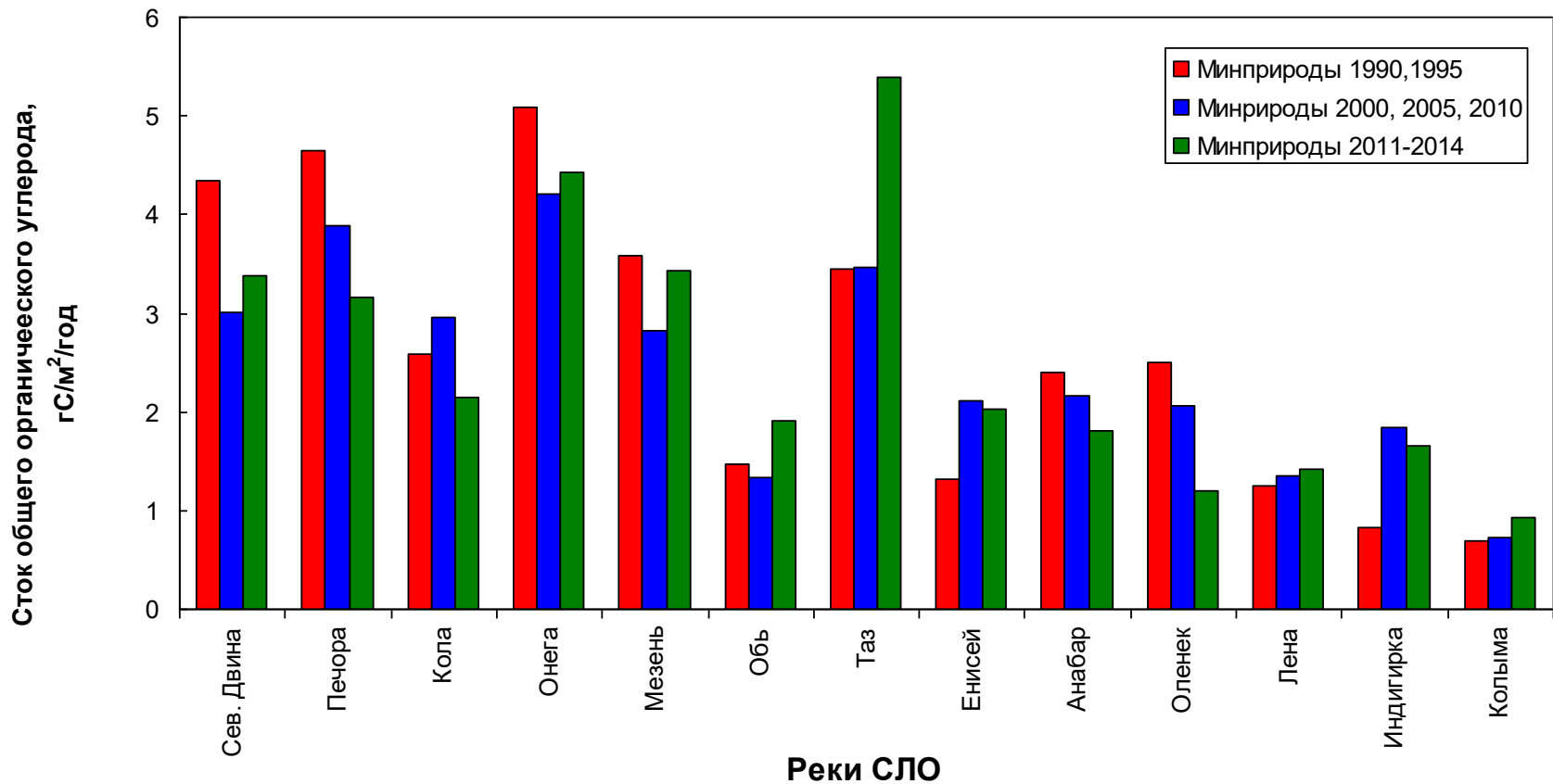
2011-2014
24.2 ТгС год-1



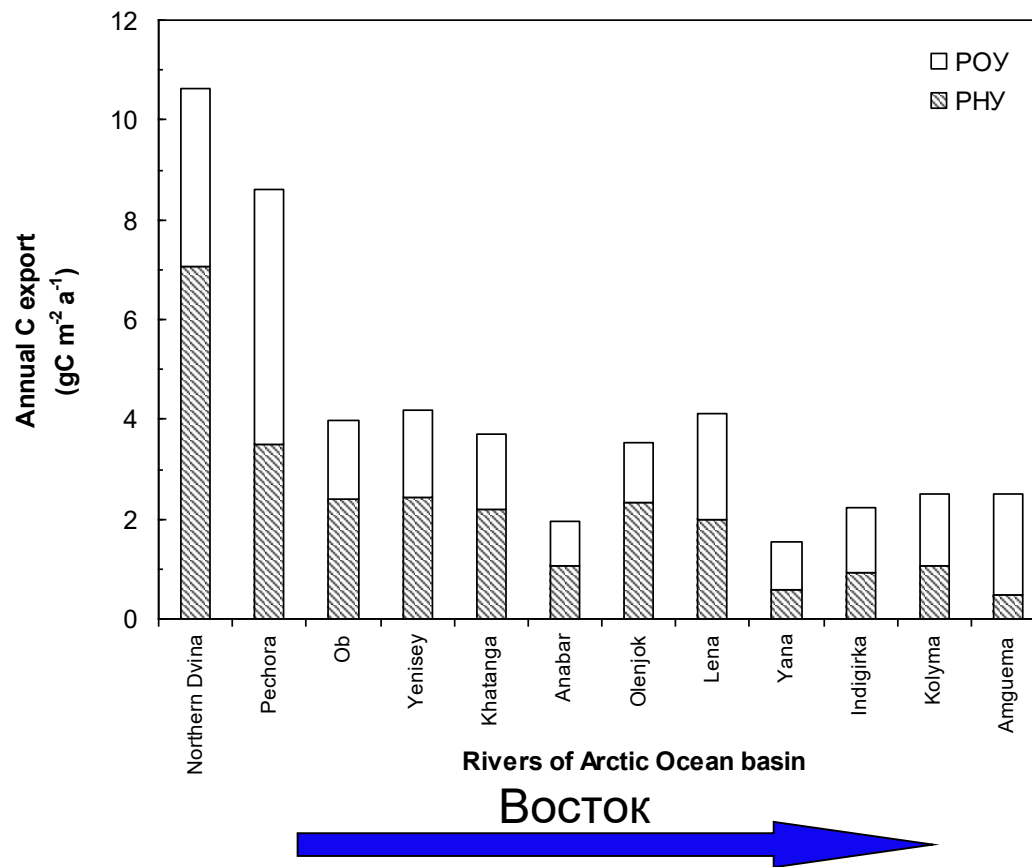
Европейская территория РФ



Реки бассейна Северного Ледовитого океана

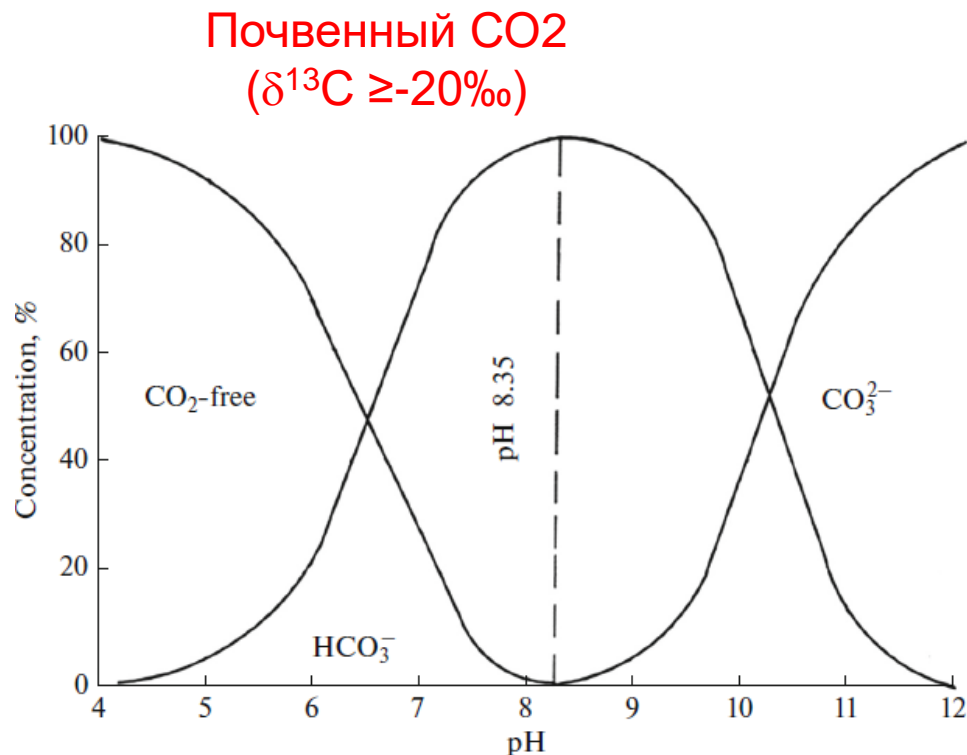


Экспорт общего углерода нормализованный на единицу площади водосборного бассейна рек бассейна Северного ледовитого океана

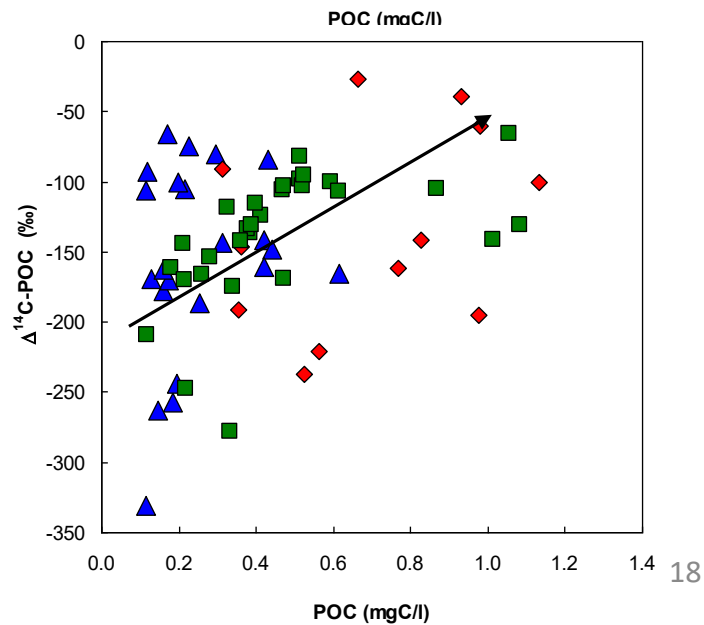
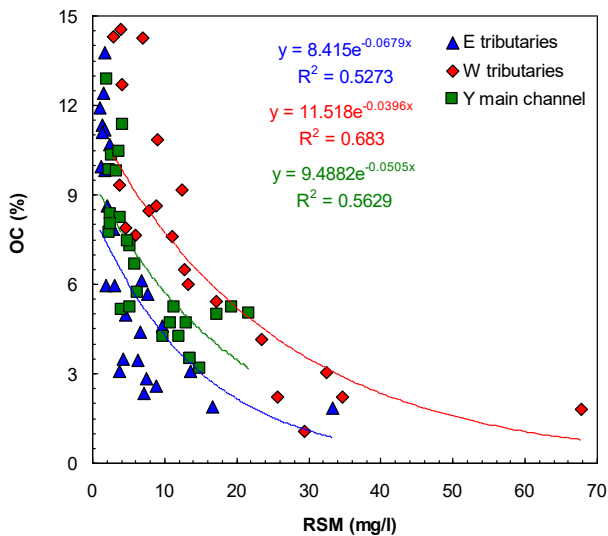
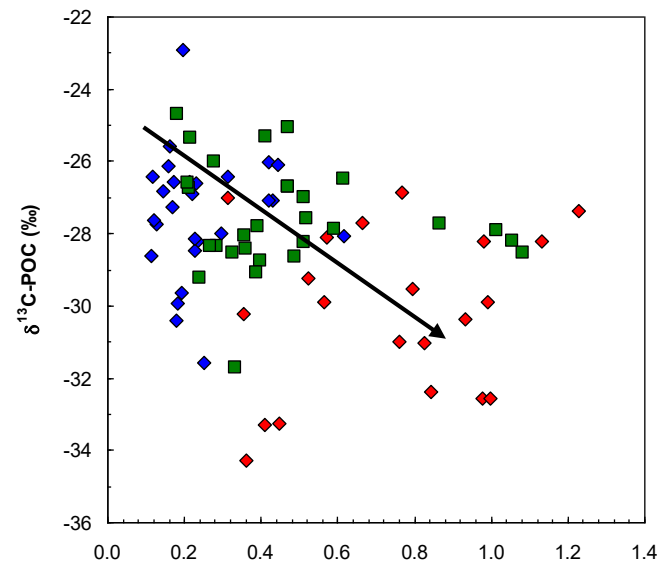
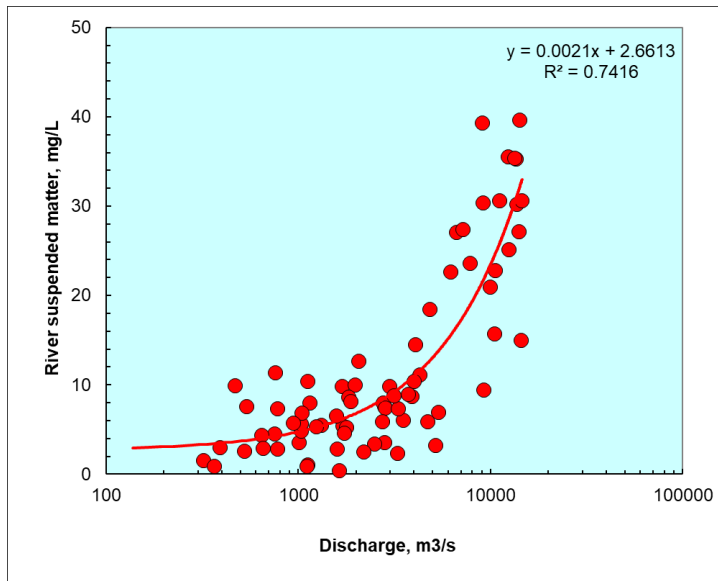


РНУ – продукт выветривания материнских пород
и поглощения CO_2 из атмосферы / почвенного
воздуха
Силикатное выветривание – 2
молекулы CO_2

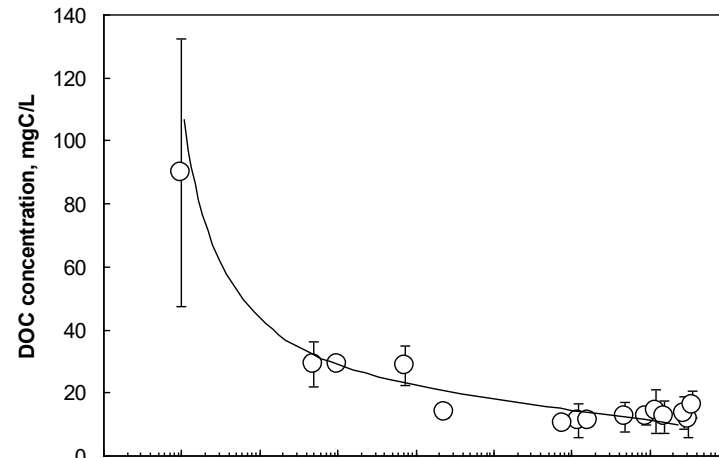
Карбонатное выветривание – 1 молекула CO_2
(температуро-зависимый процесс)



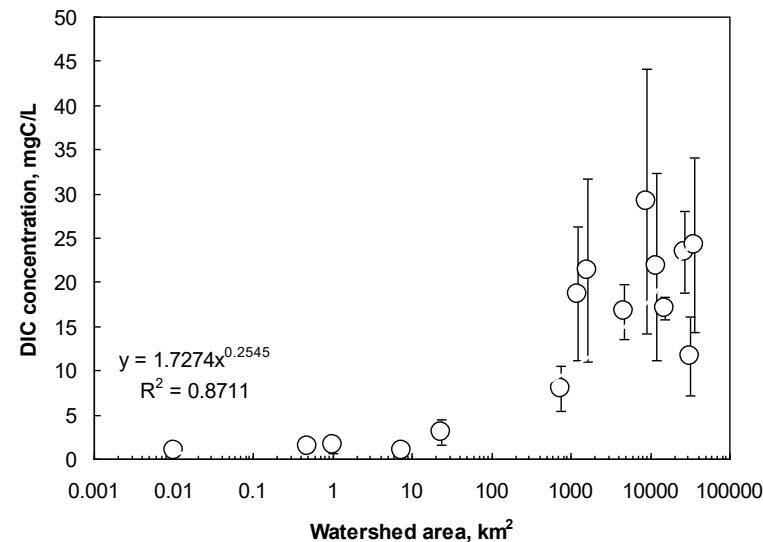
Органическое вещество речных взвесей



Изменение концентраций углерода в континууме от почвенных растворов к водотокам верхних порядков – поступление в конечный водоем стока



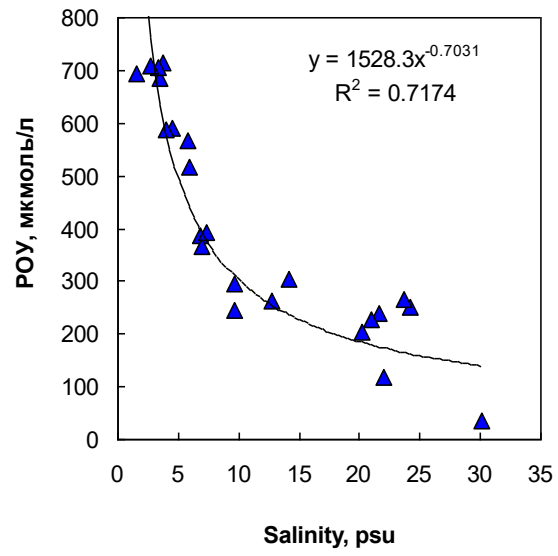
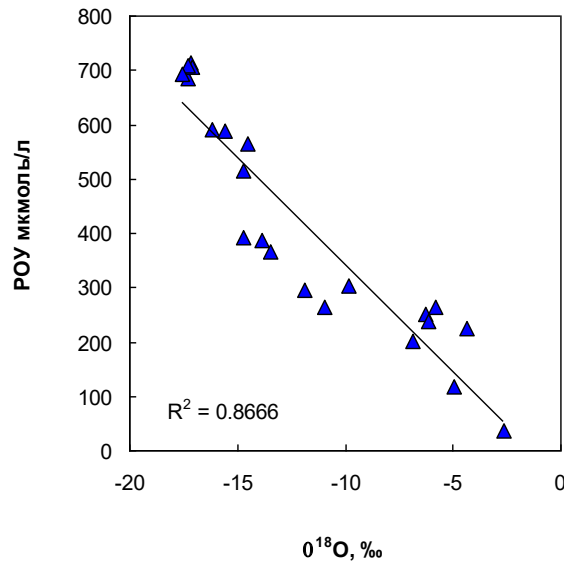
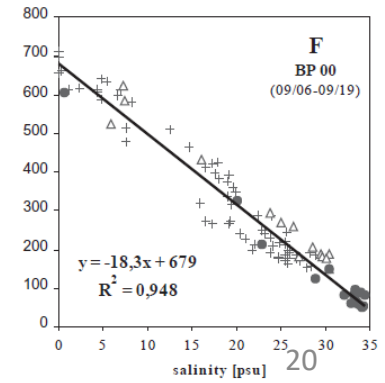
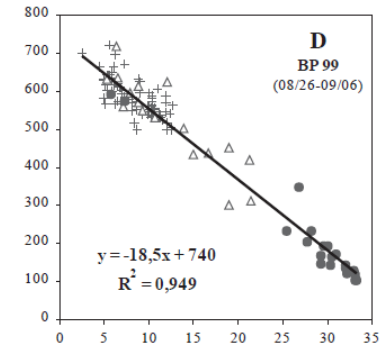
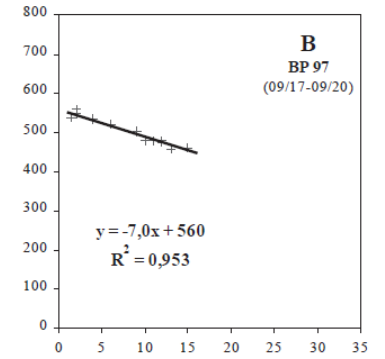
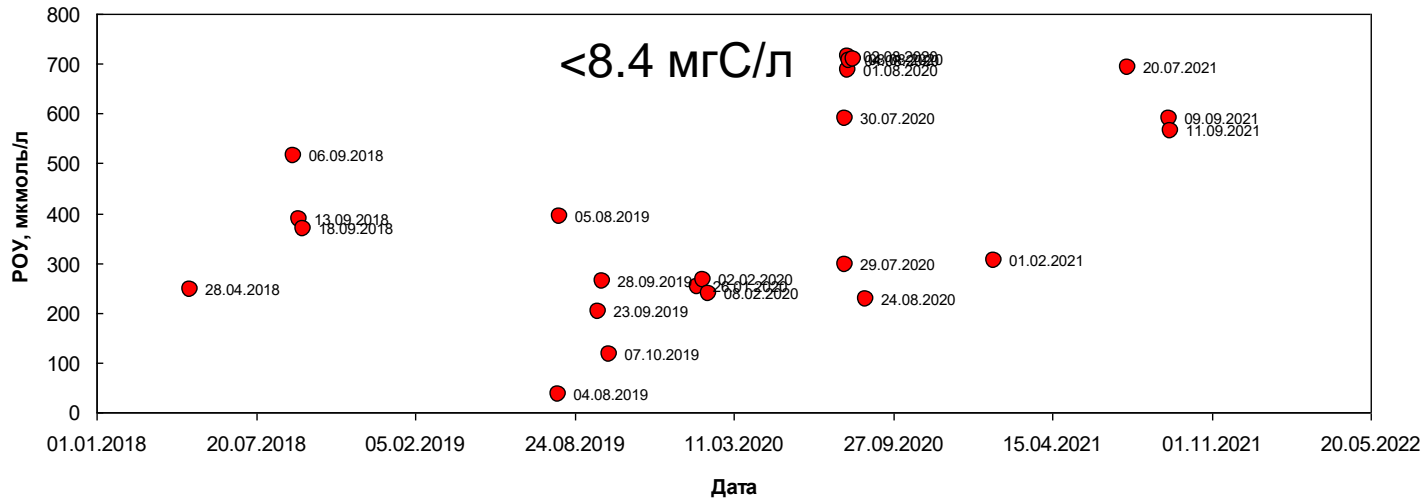
Снижение
>80%



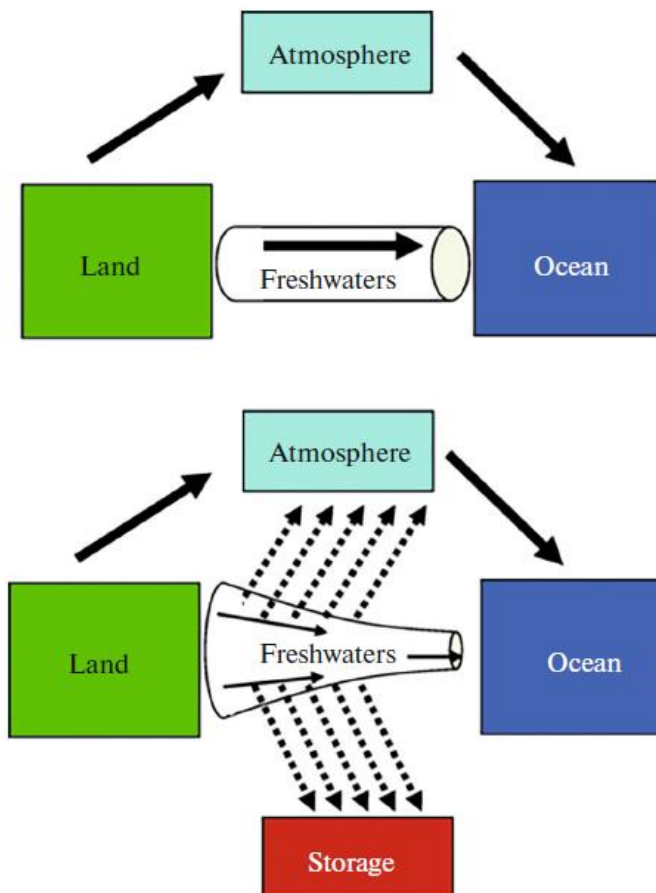
>10-кратный рост

Эстуарная зона (Енисейский залив)

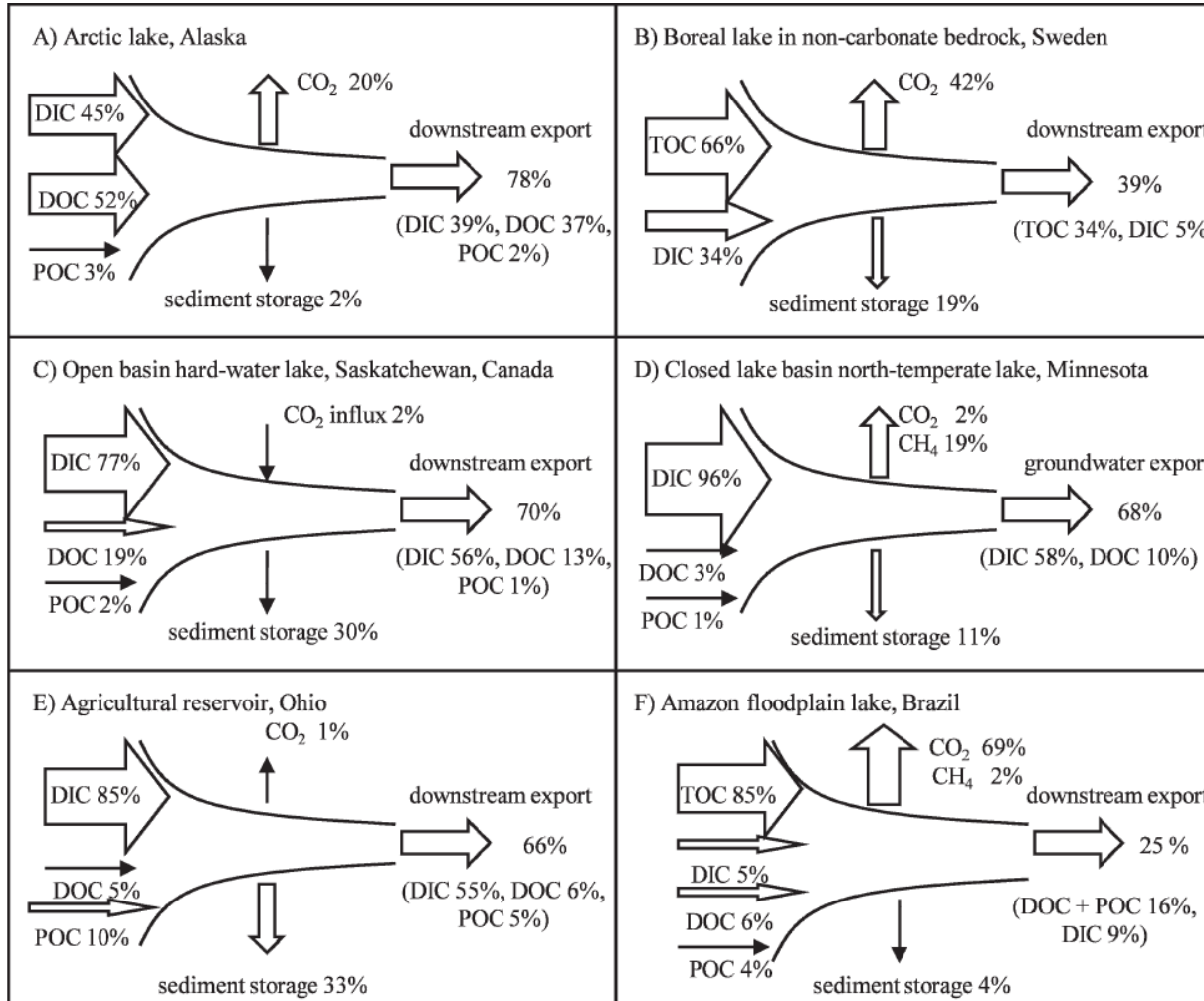
Yenisei



Концепции пассивной («водопроводной») и активной («печной») трубы



Река – «печная труба» (chimney)



Дополнение к балансу: эмиссии парниковых газов с водной поверхности

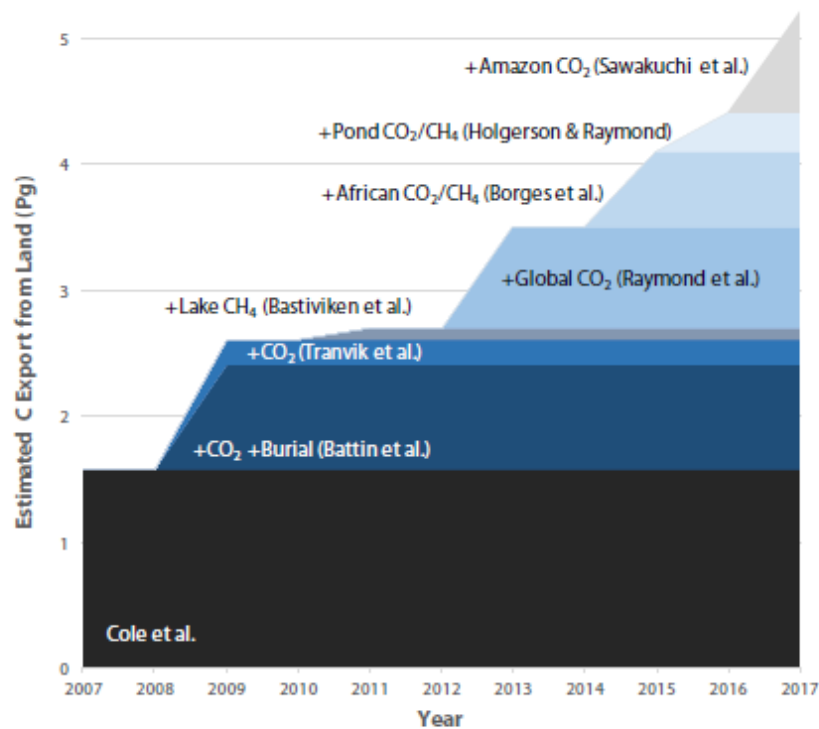
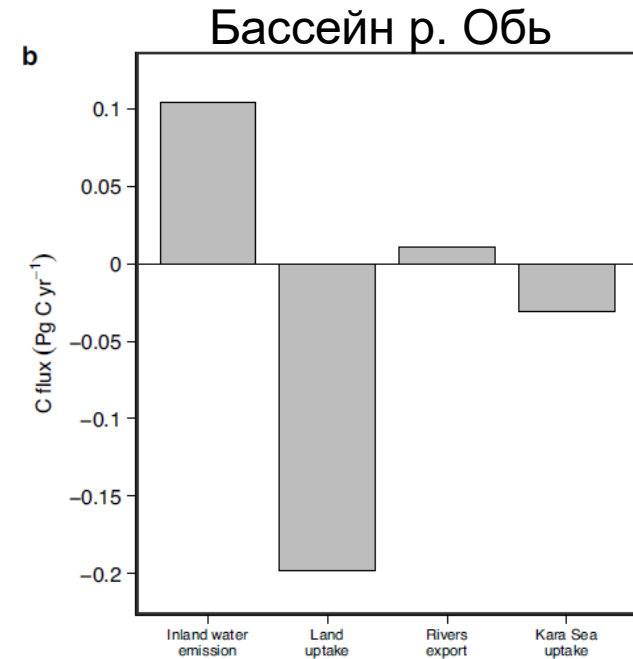


Fig. 1. Potential cumulative estimate for total C flux from terrestrial landscapes to inland waters, minus photosynthesis. Each step represents the year and quantity of C added by a given study. The 10-yr slope is $0.31 \text{ Pg C yr}^{-1}$. Figure references refer to those in Table 1.

Drake et al. 2018



35-50% NEE

В 6.8–9.0 раз больше чем экспорт растворенного ОС

Karlsson J. et al. 2021
 NATURE COMMUNICATIONS
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-21054-1>

Перенасыщенность (oversaturation) CO₂ пресных вод

- Воды торфяных почв – до 50,000 ppm
- Воды органических горизонтов и минеральных почв – до 25,000 ppm
- Временные водотоки (весеннее половодье) – до 10,000 ppm
 - Водотоки 1-2 порядков 500-35,000 ppm
 - Водотоки высоких порядков 100 – 10000 ppm

Прямые измерения эмиссий

- Метод турбулентных пульсаций
- Плавающие камеры
 - ИК-анализатор (напр. Vaisala)
 - Отбор шприцами с последующим определением концентраций ПГ на ИК-анализаторах, ГХ, CRDS (+ изотопный состав)



Оценка эмиссий через измерения концентраций растворенного CO₂

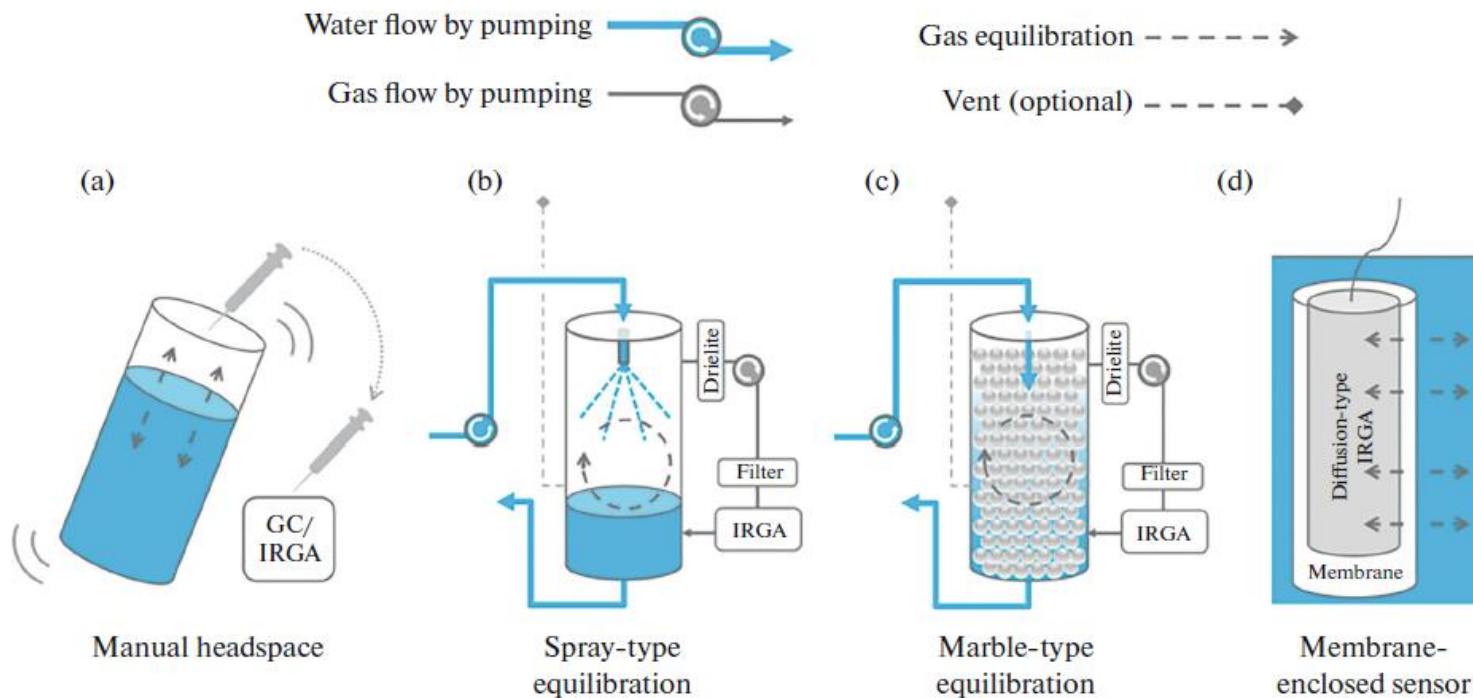


Fig. 3. Schematic diagrams of four equilibration methods: (a) manual headspace equilibration, (b) spray-type equilibrator, (c) marble-type equilibrator, and (d) membrane-enclosed sensor (Yoon et al., 2016).

Расчет эмиссии

$$FCO_2(\text{emission rate}) = k * (pCO_2 \text{ water} - pCO_2 \text{ atmosphere})$$

The classical Wanninkhof (2014) approach determines the air-water gas exchange coefficient (k) assuming that the wind is the sole forcing factor and is given by the following equation

$$k = 0.0283 * u_{10}^2 * (Sc/660)^{-1/2}$$

where u_{10} is wind speed at 10 m height and Sc is the Schmidt number of the gas.

Gas transfer velocity in freshwater lotic systems is driven by water turbulence/hydraulics

Raymond et al Limnology and Oceanography: Fluids and Environments 2 (2012): 41–53

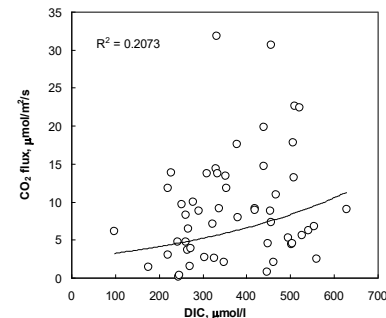
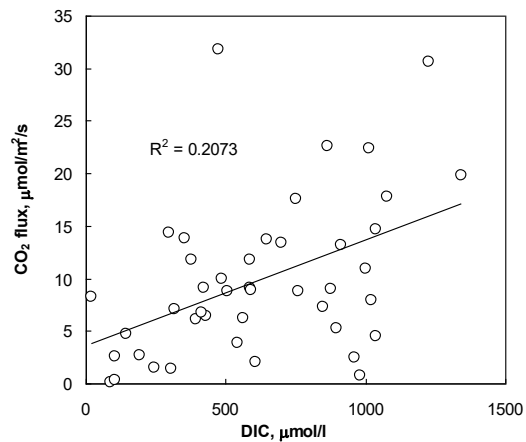
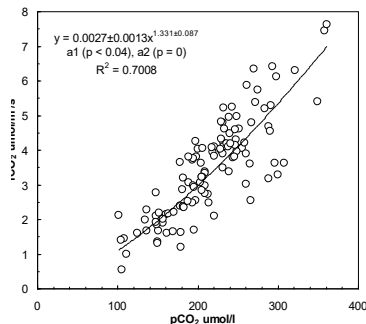
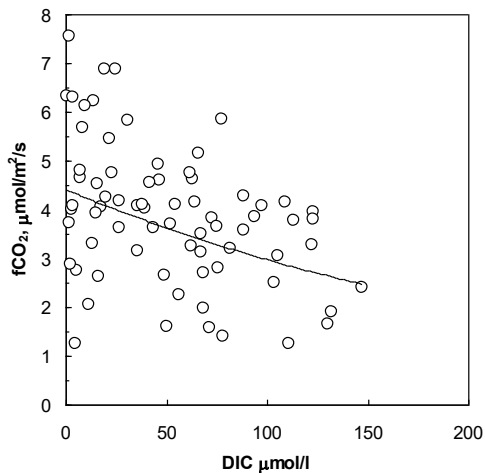
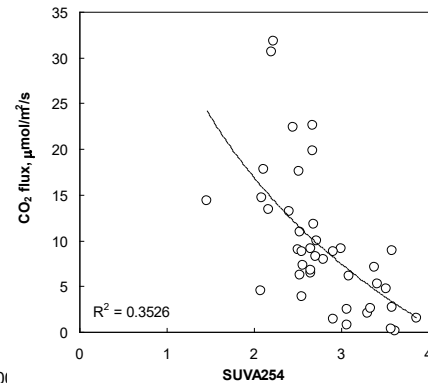
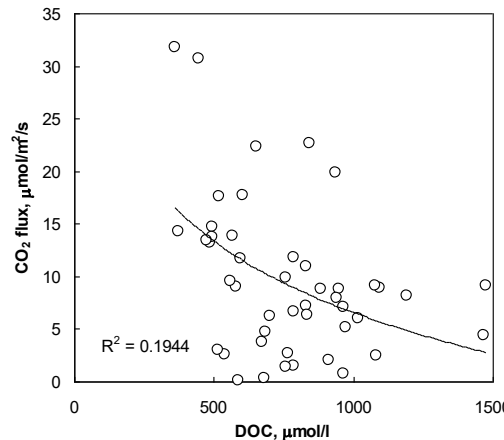
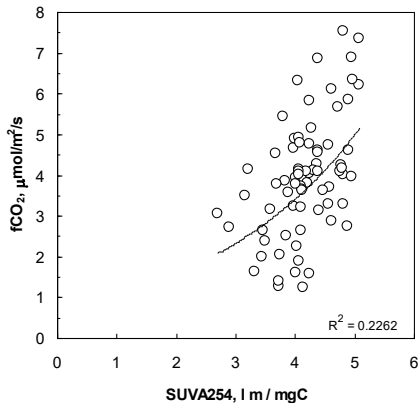
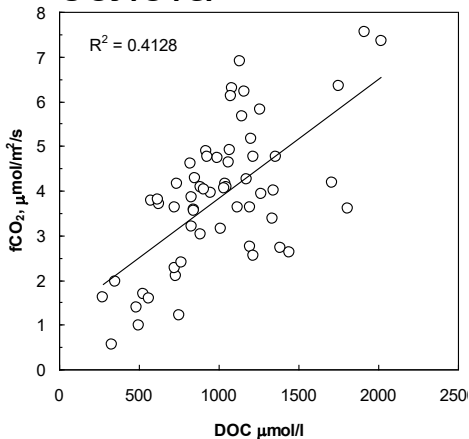
Table 2 Fitted equations for predicting the k_{600} ($m\ d^{-1}$) based on stream velocity (V , in $m\ s^{-1}$), slope (S ; unitless), depth (D , in meters), discharge (Q , in $m^3\ s^{-1}$), and the Froude number ($Fr = V/(gD)^{0.5}$). Also displayed are the standard deviations (± 1 SD) for the equation parameters, r^2 , slope ($\pm SE$), and y -intercept ($\pm SE$ for regressions of the equation output vs. actual values; Fig. 3). All p -values for the regressions are 0.0001.

Model equation	r^2	Slope	y -Intercept
1. $k_{600} = (VS)^{0.89 \pm 0.020} \times D^{0.54 \pm 0.030} \times 5037 \pm 604$	0.72	0.92 ± 0.024	0.98 ± 0.17
2. $k_{600} = 5937 \pm 606 \times (1 - 2.54 \pm 0.223 \times Fr^2) \times (VS)^{0.89 \pm 0.017} \times D^{0.58 \pm 0.027}$	0.76	0.94 ± 0.022	0.76 ± 0.16
3. $k_{600} = 1162 \pm 192 \times S^{0.77 \pm 0.028} V^{0.85 \pm 0.045}$	0.54	0.91 ± 0.036	0.91 ± 0.24
4. $k_{600} = (VS)^{0.76 \pm 0.027} \times 951.5 \pm 144$	0.53	0.82 ± 0.037	0.92 ± 0.24
5. $k_{600} = VS \times 2841 \pm 107 + 2.02 \pm 0.209$	0.55	1.0 ± 0.038	$-4.8 \times 10^{-3} \pm 0.26$
6. $k_{600} = 929 \pm 141 \times (VS)^{0.75 \pm 0.027} \times Q^{0.011 \pm 0.016}$	0.53	0.92 ± 0.036	0.81 ± 0.24
7. $k_{600} = 4725 \pm 445 \times (VS)^{0.86 \pm 0.016} \times Q^{-0.14 \pm 0.012} \times D^{0.66 \pm 0.029}$	0.76	0.95 ± 0.023	0.57 ± 0.17

Другие драйверы эмиссии CO2

Дренируются верховые олиготрофные болота

Дренируются низинные минеротрофные болота



Минерализация
аллохтонного ОВ

Минерализация
автохтонного ОВ

Масштабирование точечных измерений эмиссионных потоков

Определение площади водного зеркала

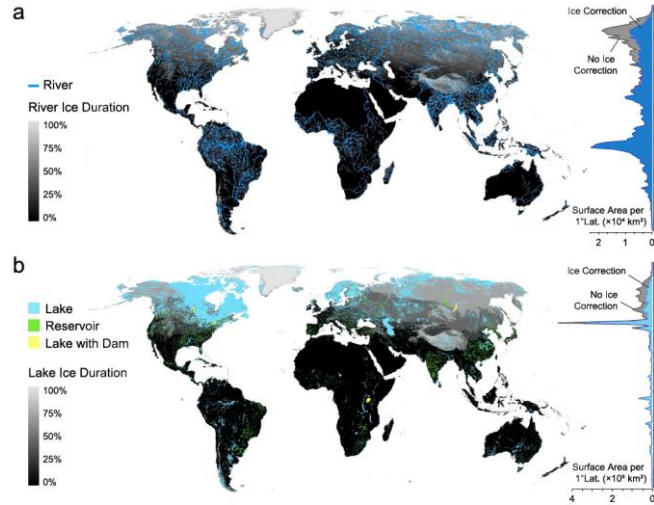
Базы данных

- **Водная поверхность:** JRC GSW (Pekel et al. 2016) и GSWD (Pickens et al. 2020)
- **Водотоки:** GRWL v.1.0 (Allen & Pavelsky, 2018)
- **Озера и водохранилища:** HydroLAKES v.1.1 (Messenger et al., 2016)

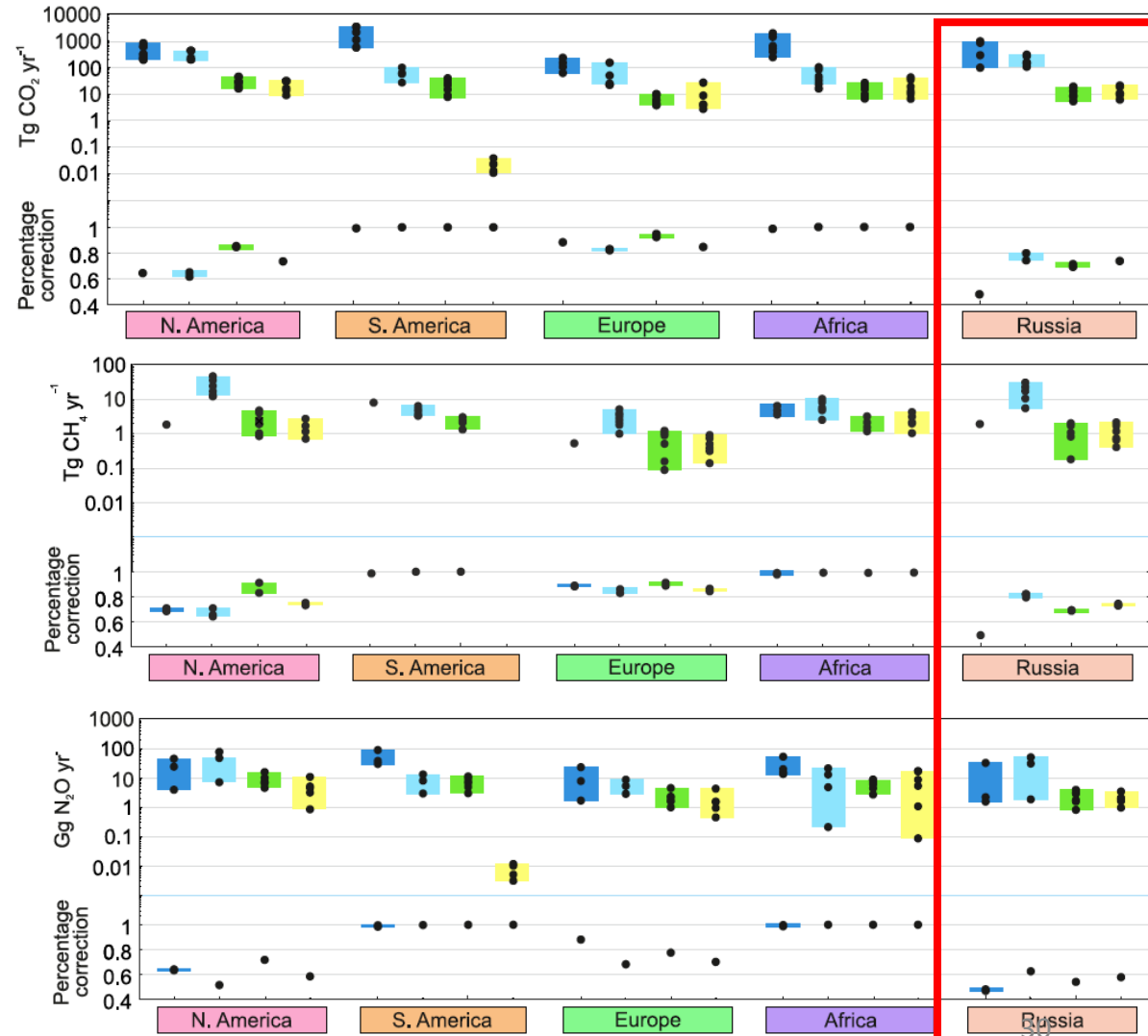
Размеры пикселя от 30 м

Не учтены водотоки низких порядков, малые озера

RECAP2



- River
- Lake
- Reservoir
- Lake with Dam



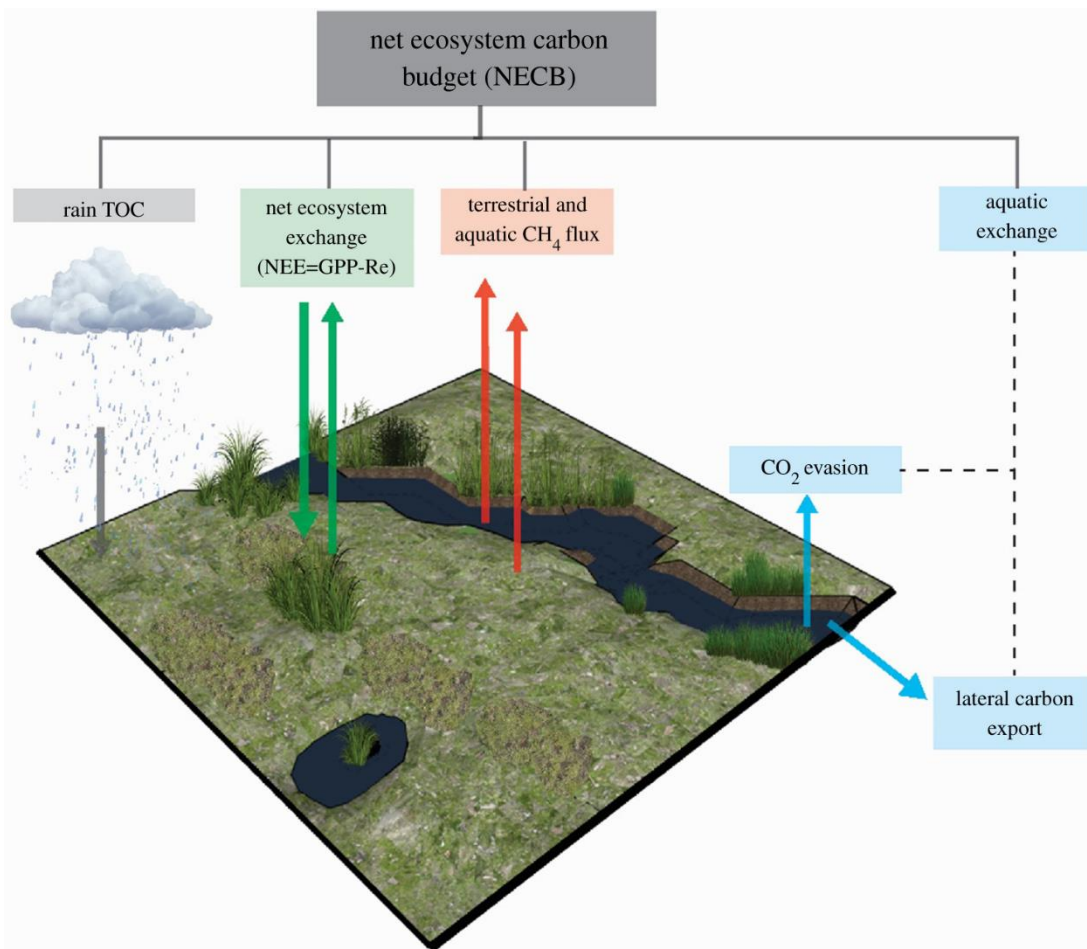
Lauerwald et al., 2023
10.1029/2022GB007658

Inland Water Greenhouse Gas Budgets for RECCAP2: 2. Regionalization and Homogenization of Estimates

Предложения в государственную программу
РИТМ углерода по мониторингу
латеральных потоков

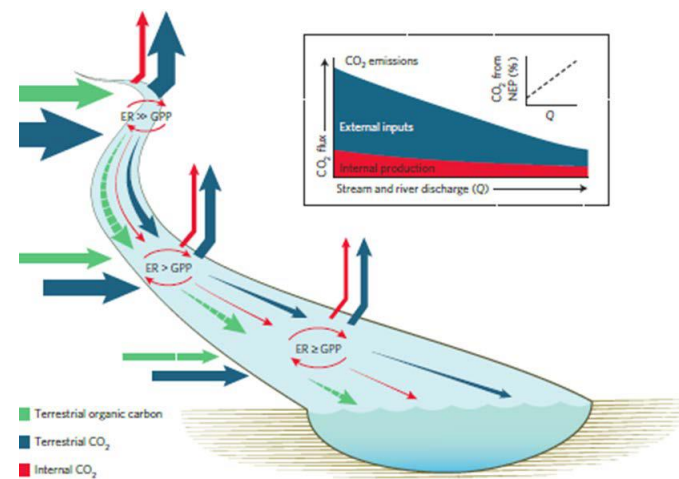
Оценка латерального стока терригенного углерода

Элементарный водосборный бассейн



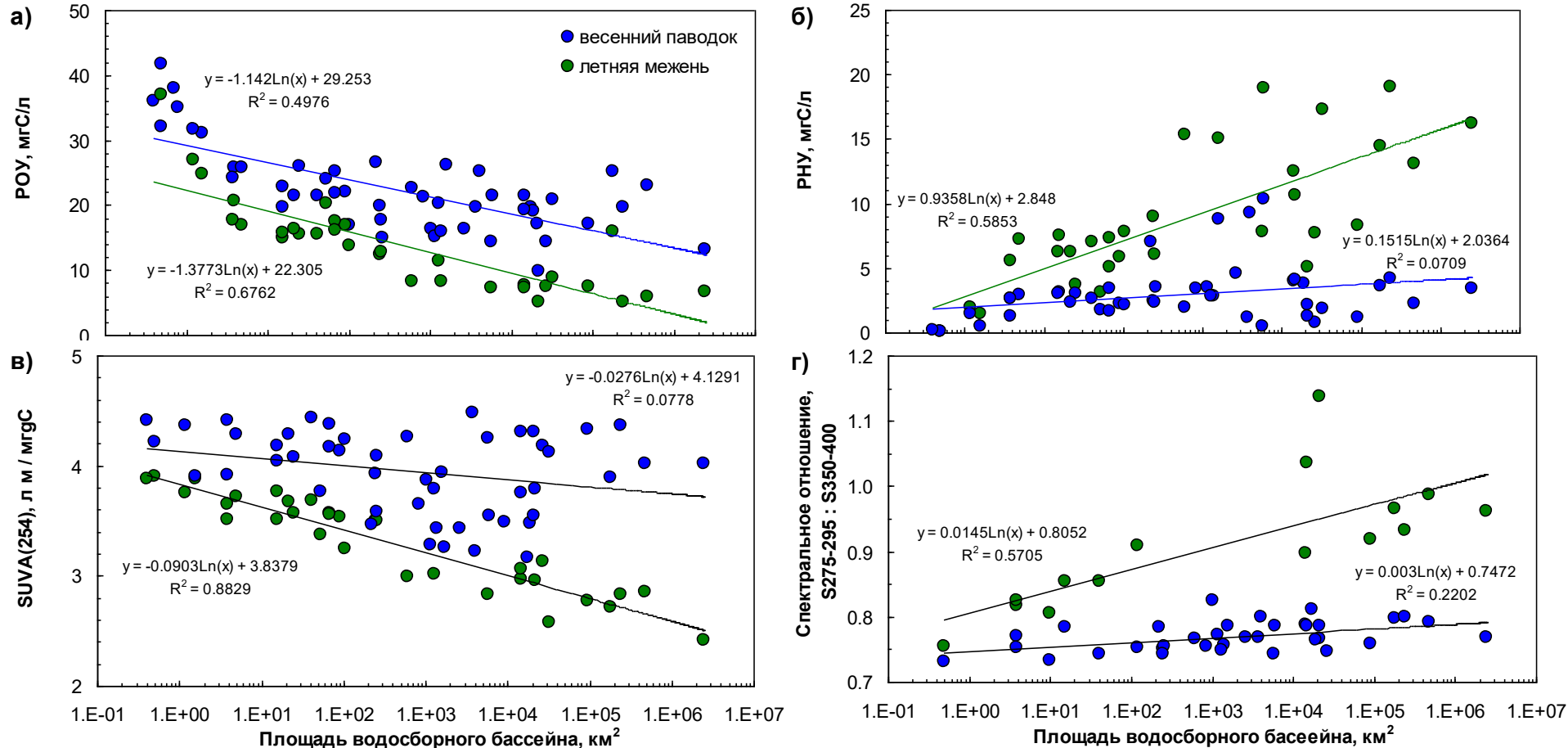
Taillardat et al. 2020

Внутрирусловые процессы в реках

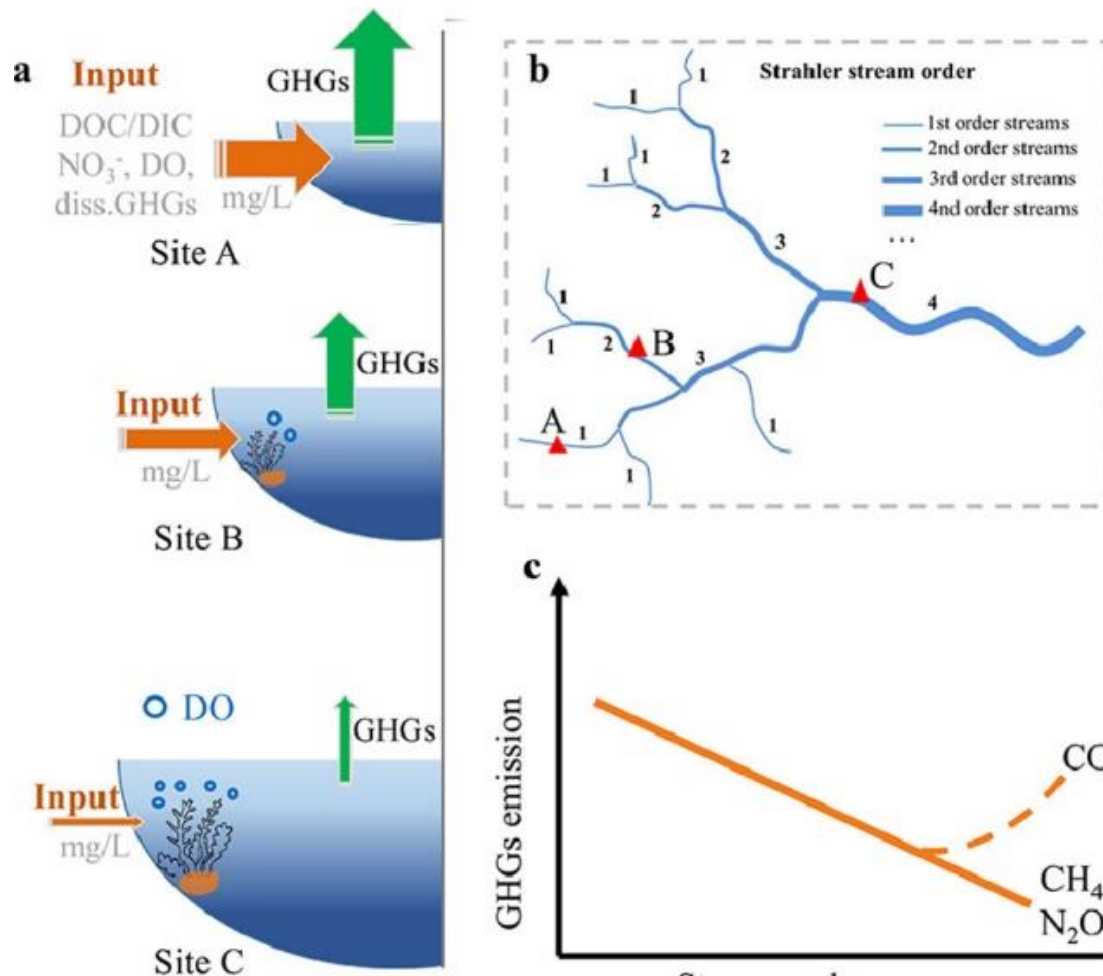


Karlsson et al., 2016
Hotchkiss et al., 2015

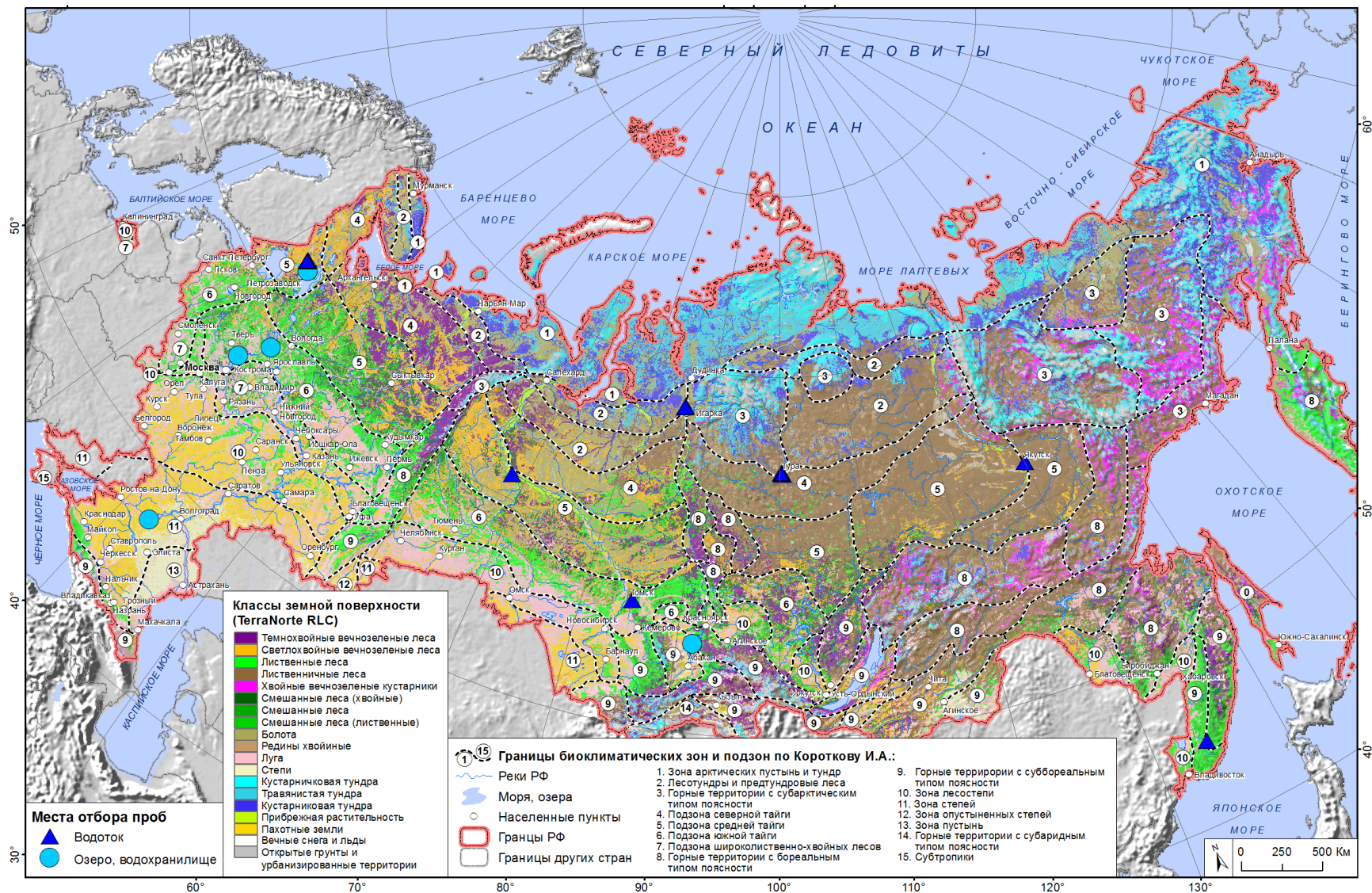
Размер бассейна имеет значение



- Стационарные посты наблюдений на водотоках разного порядка и или озер разной площади в пределах репрезентативных ландшафтов



Планируемые посты мониторинга в 2024 г.



Охват биоклиматических зон в 2024 г.

- ЕТР (Карелия) – средняя тайга (ИВПС КарНЦ РАН)
- ЕТР + Центральная Сибирь (юг) (ИФА РАН)
- Западная Сибирь – средняя тайга (болота) (ЮГУ)
- Западная Сибирь – лесостепь? (ИМКЭС СО РАН)
- Средняя Сибирь (Восточная) – лесотундра (ИЛ СО РАН)
- Средняя Сибирь (Восточная) – северная тайга (ИЛ СО РАН)
- Восточная Сибирь (Центральная Якутия) - северная тайга (ИБПК СО РАН)
- **Восточная Сибирь (дельта Лены) – тундра (МГУ)**
- Дальний Восток – зона широколиственных лесов (ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН)

•Количественное определение стока

Опробывание

Весеннее половодье не реже одного раза в 5-7 дней



Летне-осенний период не реже одного раза в 14 дней



Зимняя межень - ежемесячно

Фильтрация

0.45 мкм

0.22 мкм

0.7 мкм (GFF)



Консервация и хранение

ГОСТ:
ортофосфорная кислота...

замораживание

Анализ

- POУ как NPOС

(анализатор, высокотемпературное каталитическое окисление)

- PНУ

(анализатор, напр. vario TOC Cube A 5199 TO Elementar, Shimadzu TOC-LCSN)

-Оптические свойства (поглощение в диапазоне 200-800 нм, UV-Vis Varian 100)

Опционно

- Главные анионы и катионы (ICS-1100 / ICP-MS)

- Биогенные элементы: NO₃, NH₄, PO₄ (QuikChem 8500 Series 2 FIA System, Lachat)

Взвешенное органическое вещество

Методические рекомендации по отбору будут представлены Лабораторией эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева ГФ МГУ

- **Определение концентраций**

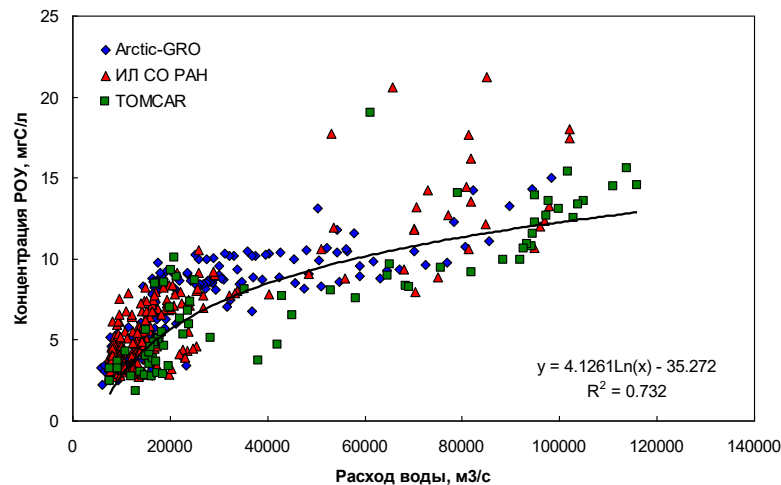
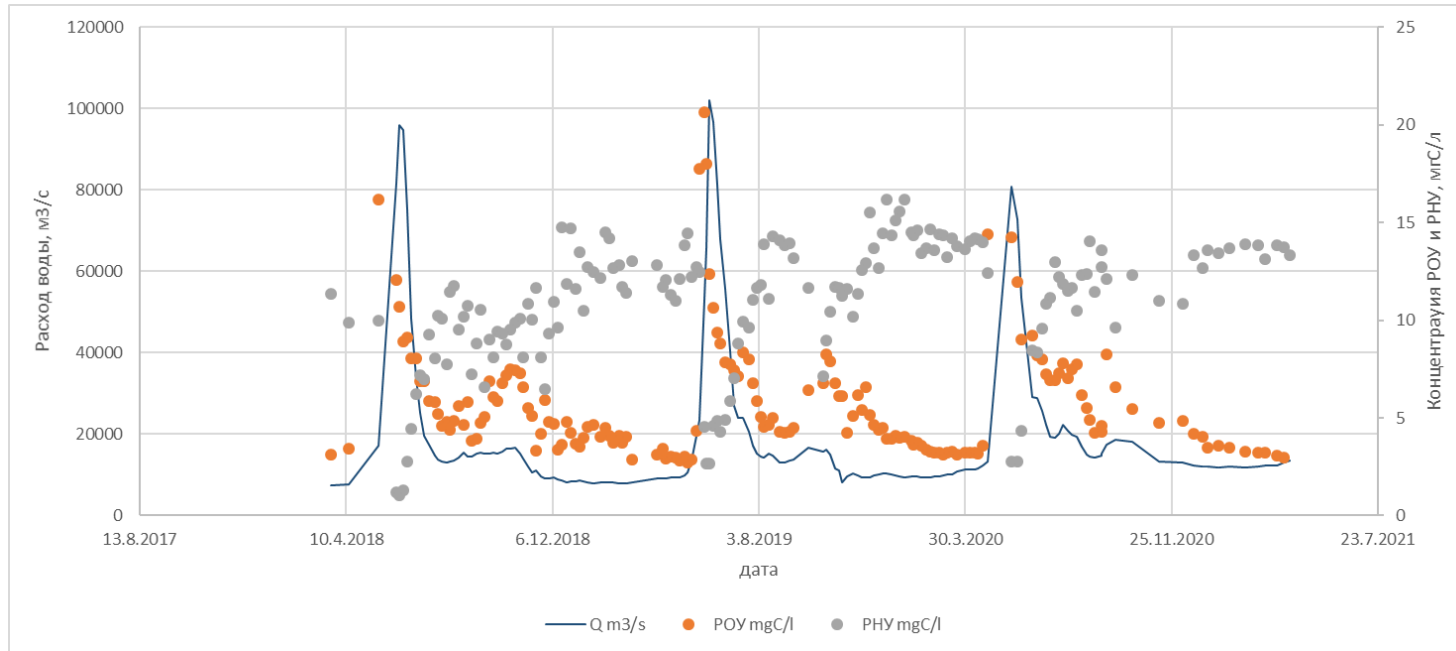
0.45 мкм (предвзвешенные фильтры)

0.22 мкм (предвзвешенные фильтры)

- **Отбор взвеси на анализ**

0.7 мкм (GFF)

Пример регулярного мониторинга (р. Енисей в замыкающем створе в г. Игарка)

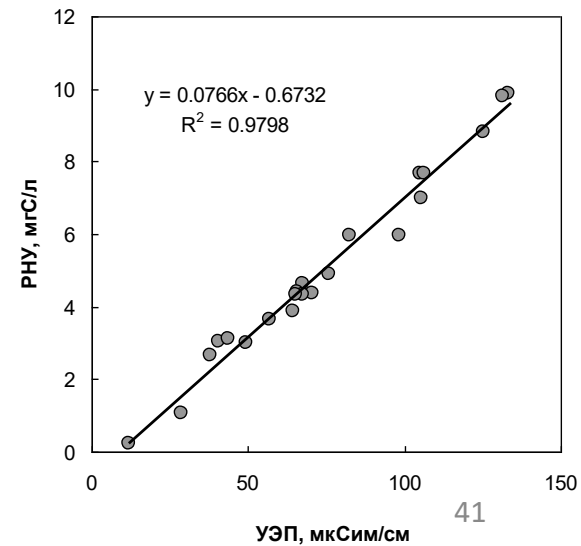
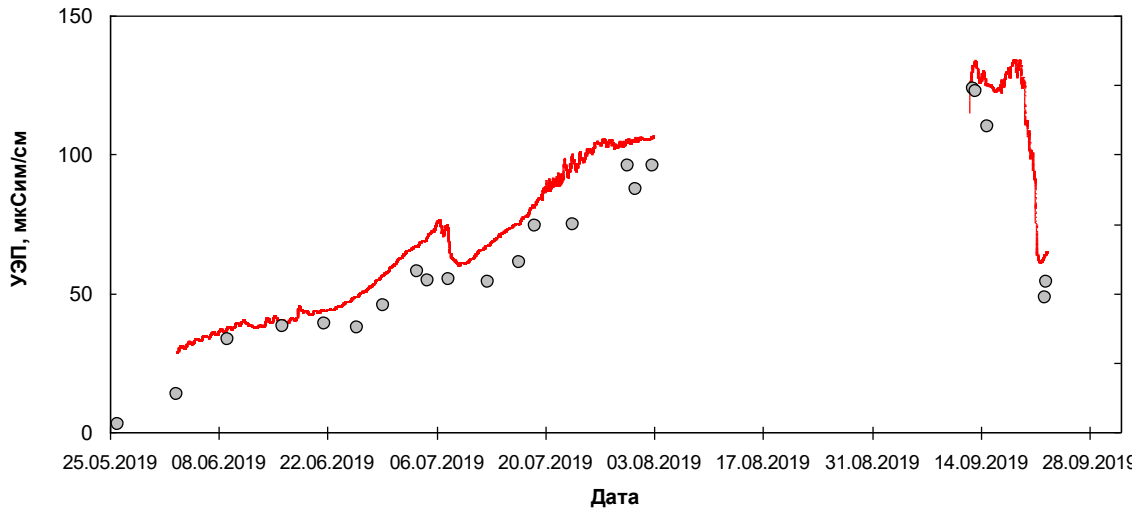
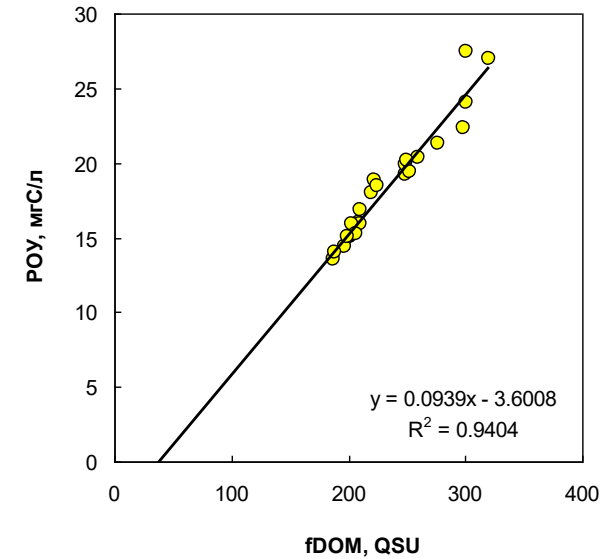
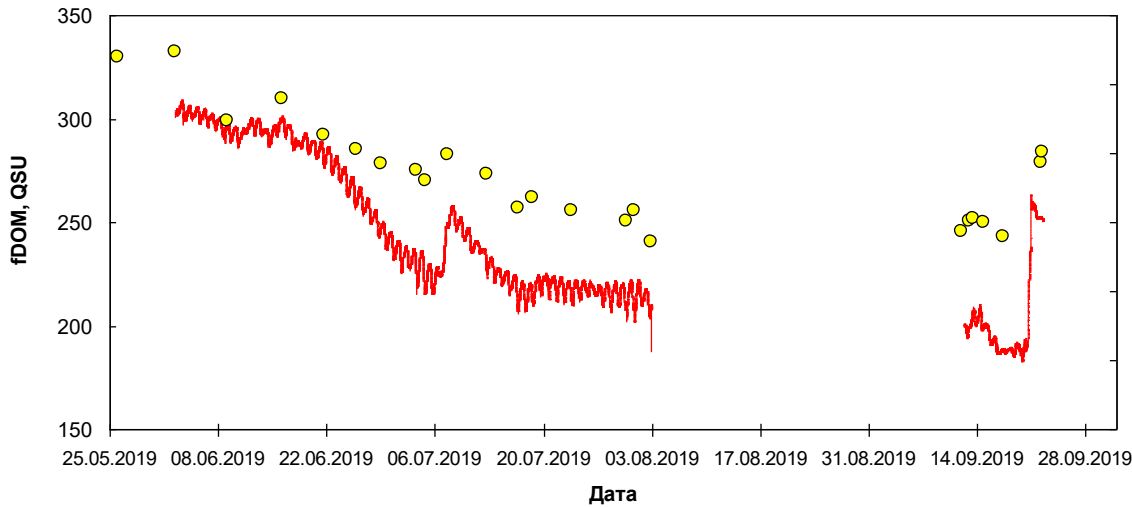


•Квази-непрерывные измерения

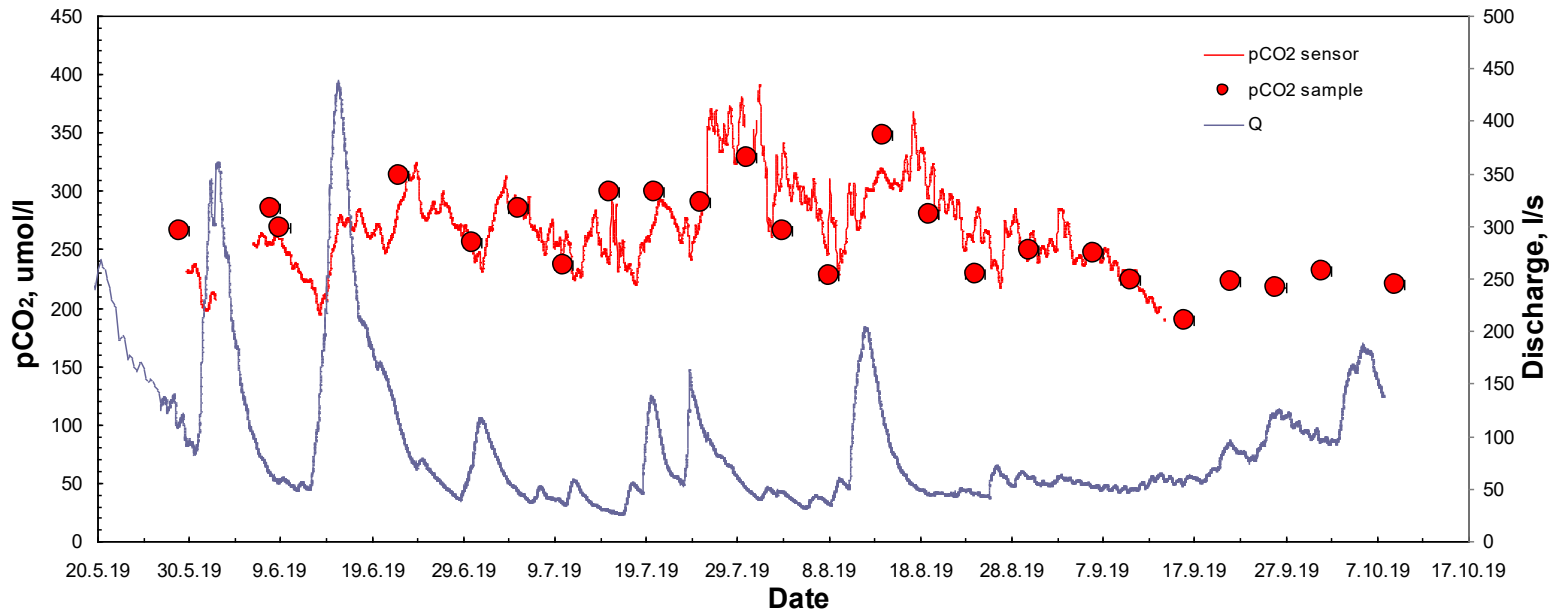
- Уровень воды & Тводы
 - HOBO U20
- мультипараметрические зонды YSI EXO2
 - pH
 - SpCond - PНУ
 - fDOM - POУ
- pCO2
 - Vaisala GMT222
- Растворенный кислород (DO)
 - MiniDOT



Пример (почти «идеальный») непрерывного мониторинга концентраций углерода в стоке



Непрерывный мониторинг концентраций углерода в стоке (растворенный CO₂)



Измерения расходов

- Уровень воды & Тводы
 - НОВО U20
- Определение скорости течения и площади сечения
 - Вертушка X
- Определение расхода и скорости течения методом консервативного трасера (NaCl) через измерение удельной электропроводности (10 сек интервал записи)
 - НОВО U24
 - YSI EXO2

Эмиссионный поток и растворенные формы ПГ

- Метод плавающих камер с ИК анализатором (CO₂)
- Метод плавающих камер с отбором в шприцы (CO₂ и CH₄ (+N₂O))
- Headspace

Здесь должны были быть слайды И.А. Репиной...

поток CO_2 (любого газа) = $k (p\text{CO}_{2\text{air}} - p\text{CO}_{2\text{water}})$

- Разработка параметризаций для расчета скорости газопереноса k (используется для расчета потоков газов в системе атмосфера-поверхность) для небольших озер по результатам **пульсационных измерений**
- Влияние скорости ветра и потока тепла на k может быть параметризовано с использованием диссипации турбулентной кинетической энергии, ϵ (определяется через поток плавучести)

$$k = \sqrt{(C_1 U)^2 + (C_2 w_*')^2} Sc^{-1/2}$$

Задача: определение коэффициентов C_1 и C_2 по данным измерений

- По данным пульсационных измерений разработка параметризаций для параметра шероховатости (динамического и для температуры) для небольших озер (используется в моделях для расчета потоков и расчета области формирования потоков (футпринт))

Дальнейшее развитие

- Организация регулярных наблюдений на репрезентативных реках и водоемах (озерах) всех биоклиматических зон РФ
- Организация постов на реках высоких порядков и интеграция наблюдений с мониторинговой сетью Росгидромета в замыкающих створах крупнейших рек России.
- Проведение экспедиционных исследований в основные фазы водного режима на ключевых участках территории России (**обсуждение**) для определения количественных характеристик потоков углерода и выноса углерода в конечные водоемы стока.
- Интеграция количественных оценок латерального стока терригенного углерода в расчеты его баланса в наземных экосистемах различных природно-климатических зон РФ.

Спасибо за внимание!