

Восьмой объединенный всероссийский метеорологический и гидрологический съезд
Санкт-Петербург 29-31 октября 2024 года

Гидродинамика приливных устьев: новые методы, новые парадоксы, новые перспективы

Алабян Андрей Михайлович^{1,2}

Демиденко Николай Александрович^{3,4}

Лебедева Серафима Витальевна⁵

Панченко Евгения Дмитриевна^{2,1}

¹*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
географический ф-т, кафедра гидрологии суши*

²*Институт водных проблем РАН, лаборатория гидродинамики, лаборатория численного гидродинамического моделирования*

³*Институт океанологии им. П.П.Ширшова,
лаборатория физико-геологических исследований им. А.П.Лисицына*

⁴*Государственный гидрологический институт*

⁵*Государственный океанологический институт им. Н.Н.Зубова*

andrei_alabyan@mail.ru
+7 977 - 505 79 00 (WhatsApp, Telegram)

В презентации использованы материалы И.Н.Крыленко, Н.А.Борисовой, Т.А.Федоровой, А.М.Медина, М. Льюмменса

2017 Приливные устья – уникальная природная лаборатория для исследования неустановившегося движения воды

Алабян А.М.

в сборнике Труды VI Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование: MARESEDU - 2017", место издания ПолиПРЕСС Тверь, с. 62-66

2019 Приливные устья – уникальное учебное пособие для студентов-гидрометеорологов

Алабян А.М.

в сборнике Труды VII Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)", место издания ООО «ПолиПРЕСС» Тверь, том 1, с. 78-80



Неприливных устьев в Русской Арктике нет

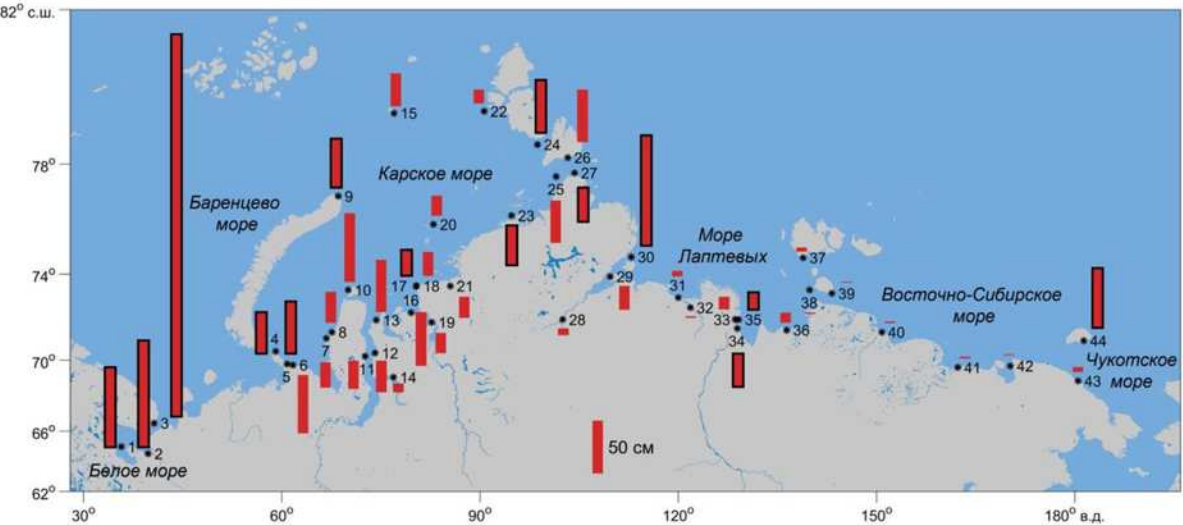
Устья рек России (В.Н.Михайлов, 1997, 1998)

Тип устьевой области	Величина сизигийного прилива, м
неприливно́я	менее 0.3
<u>микроприливная</u>	0.3 – 1.5
<u>мезоприливная</u>	1.5 -- 3
<u>макроприливная</u>	более 3

Гиперприливная более 6 м

Река	Море	Объем стока, км³/год	Площадь дельты, км²	Максимальный прилив, м
Печора	Баренцево	130	3 250	1.0
Северная Двина	Белое	108	900	1.3
Волга	Каспийское	243	11 000	0.05
Дунай	Черное	203	5 640	0.1
Нева	Черное	78.4	83	0.1
Обь	Карское	402	3 250	0.7
Енисей	Карское	597	4 500	0.7
Лена	Лаптевых	530	32 000	0.4
Яна	Лаптевых	32.4	6 600	0.2
Инди́гирка	<u>Восто́чно-Сибирское</u>	54.2	5 000	0.3
Колы́ма	<u>Восто́чно-Сибирское</u>	122	3 250	0.1

Куликов М.Е., 2024 (науч. рук. – Медведев И.П., ИО РАН)



Объекты исследования: устья рек Белого моря ... и Печоры

Наши экспедиции:

Онега – февраль 2017 г. и февраль 2019 г. (НСО), август 2017 г.

Северная Двина – июль 2016 – 2021 гг.

Мезень – август 2015 г. и 2018 г., февраль 2019 г. (НСО)

Умба, Варзуга, Кузрека – февраль 2020 г. (НСО)

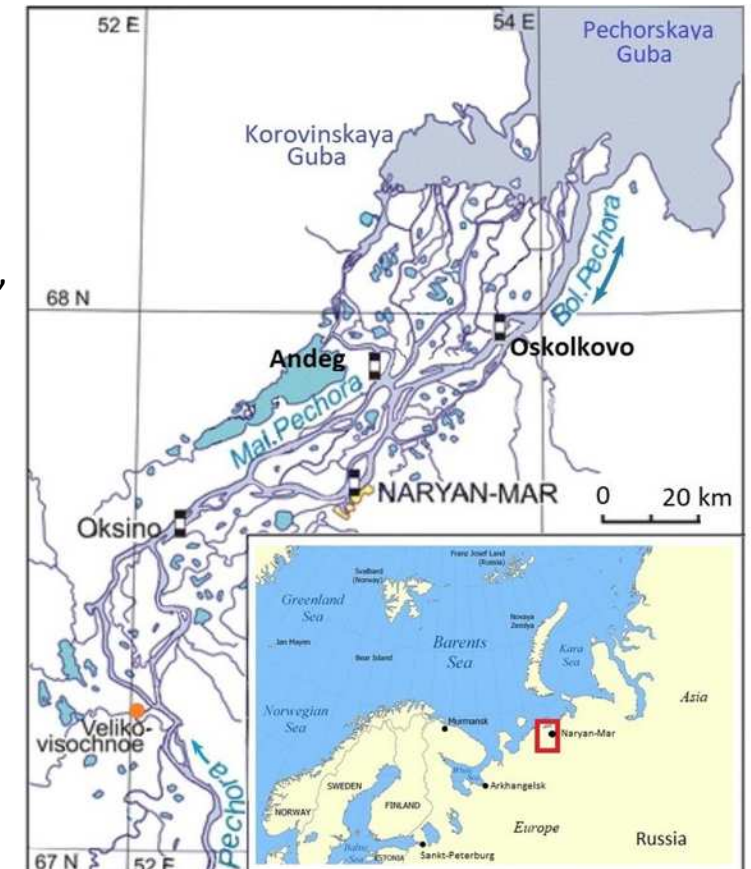
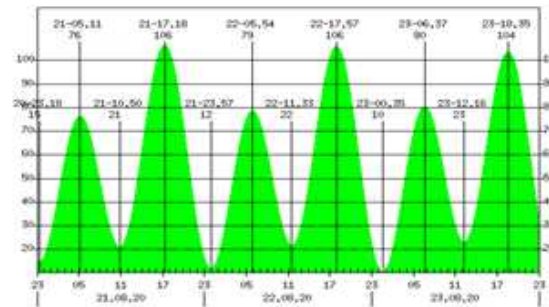
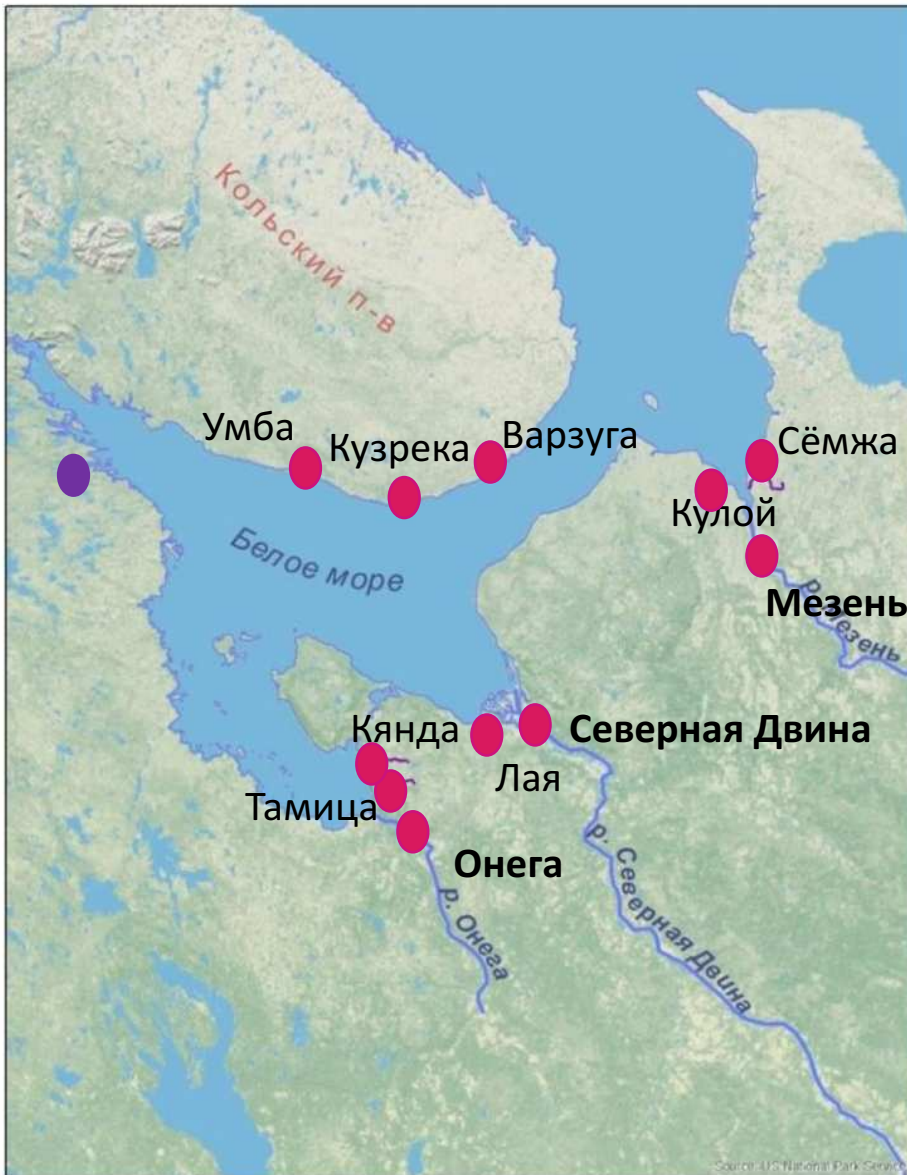
Кянда – август 2016 – 2017 гг.,
февраль 2017 г. и 2019 (НСО),
май 2018

Тамица – август 2016 – 2017 гг.,
февраль 2017 и 2021 (НСО),
май 2018

Лая - май, июль, сентябрь 2019 г.,
июль 2020

Сёмжа – август 2015 г.
и август 2018 г.

Печора – август 2022
и август 2024



МЕТОДЫ:

технологическая цепочка работы по схеме «модель – поле – модель - ...»



ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ

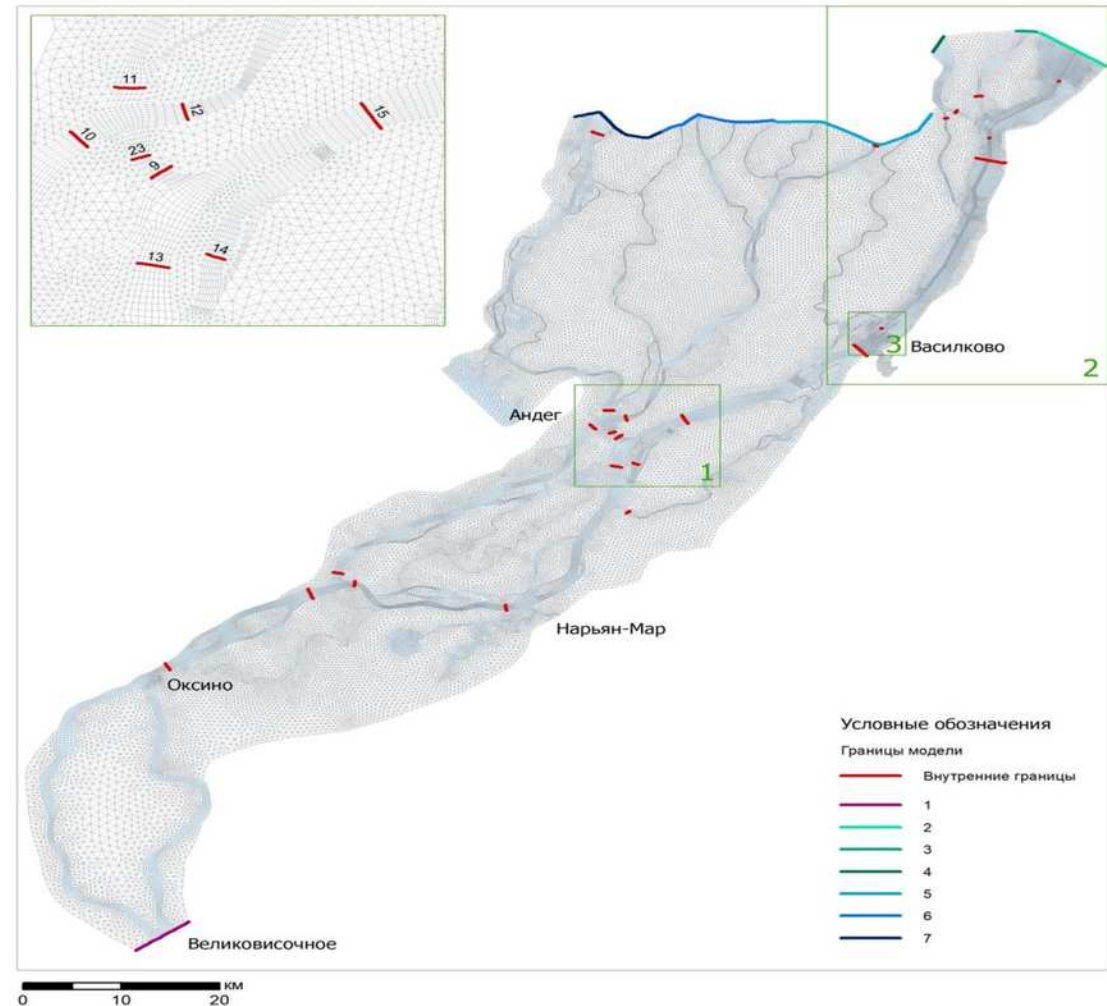
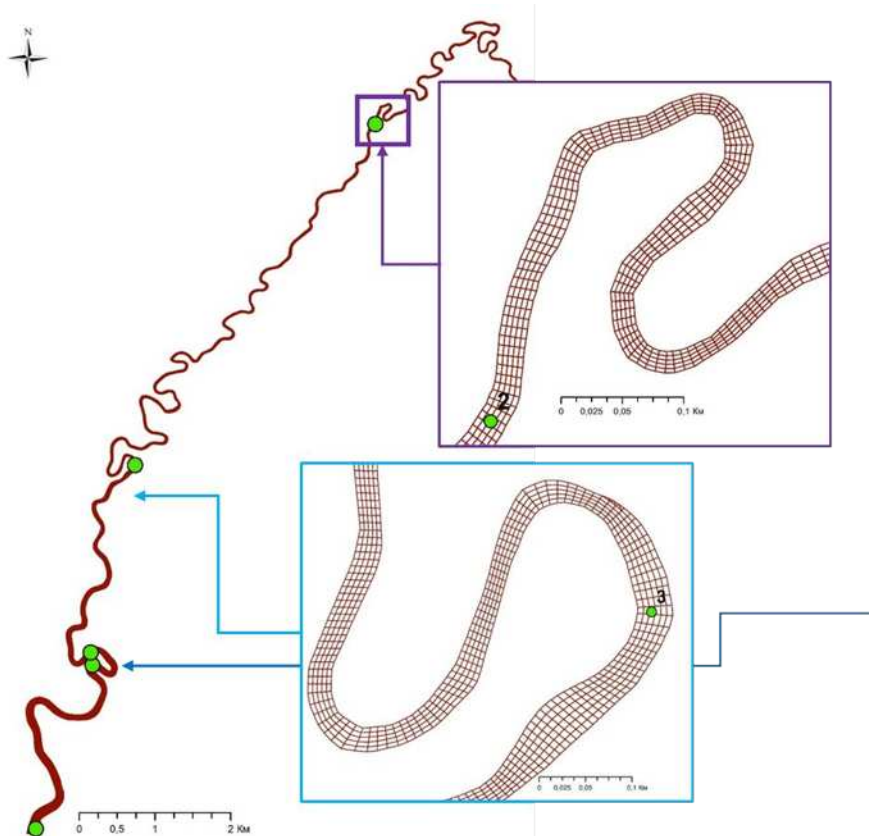


Гидродинамическое моделирование

1D: HEC-RAS (реже MIKE-11) Кянда, Тамица, Сёмжа, Лая, Онега, Мезень, Печора

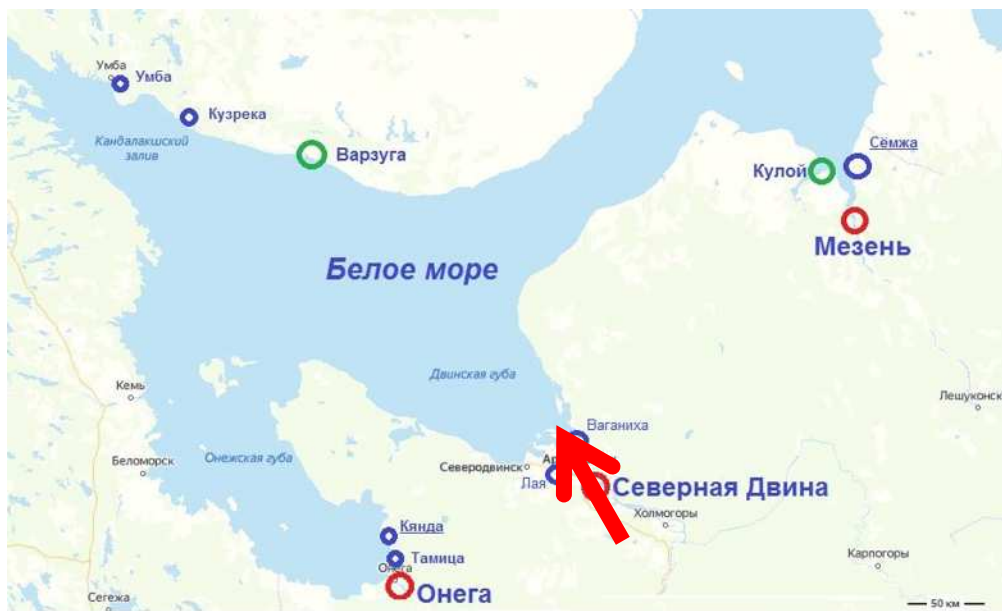
2D: SREAM_2d Онега, Северная Двина, Печора, Сёмжа

«3D»: DELFT3D Онега, Мезень, Обь

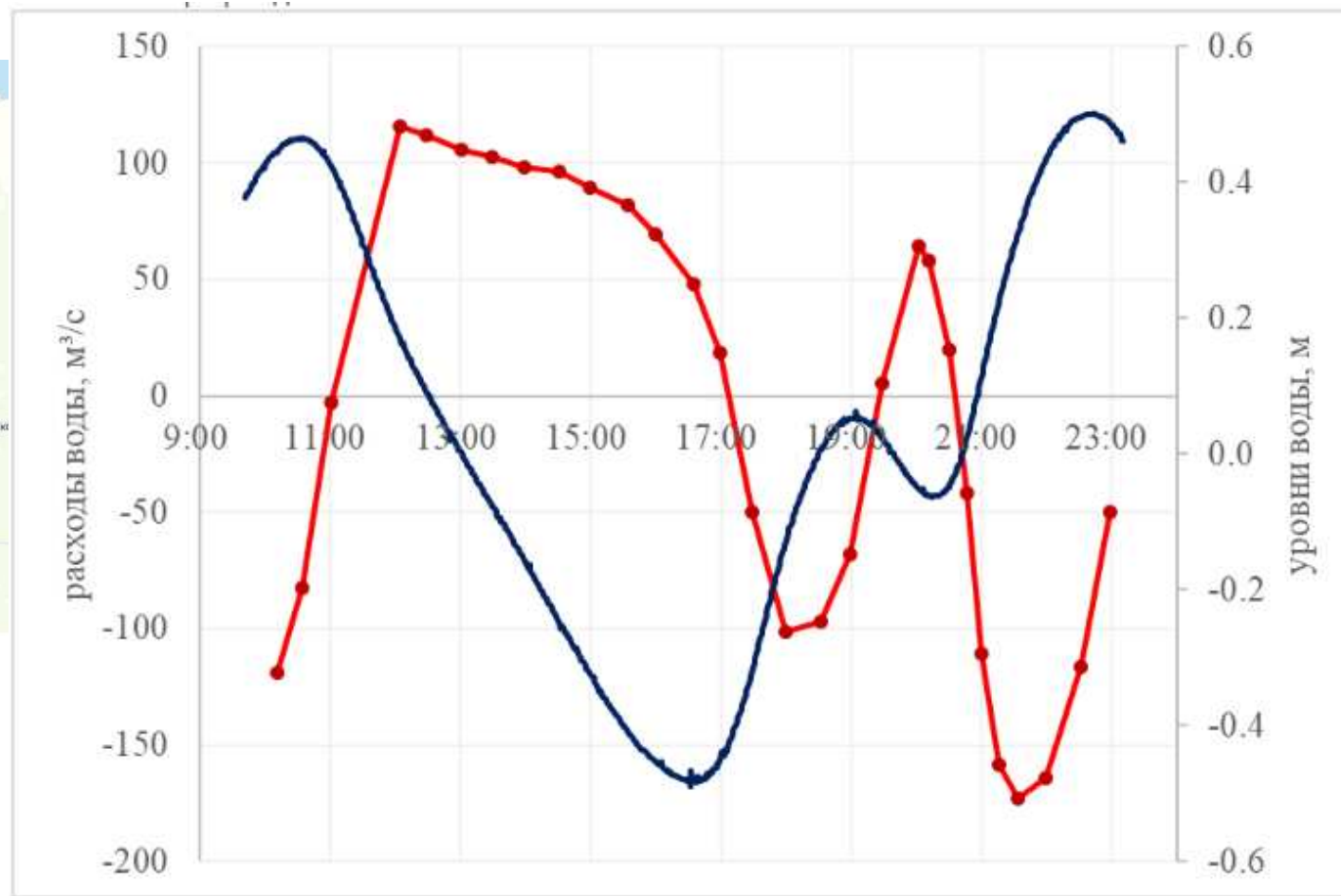


ПАРАДОКСЫ:

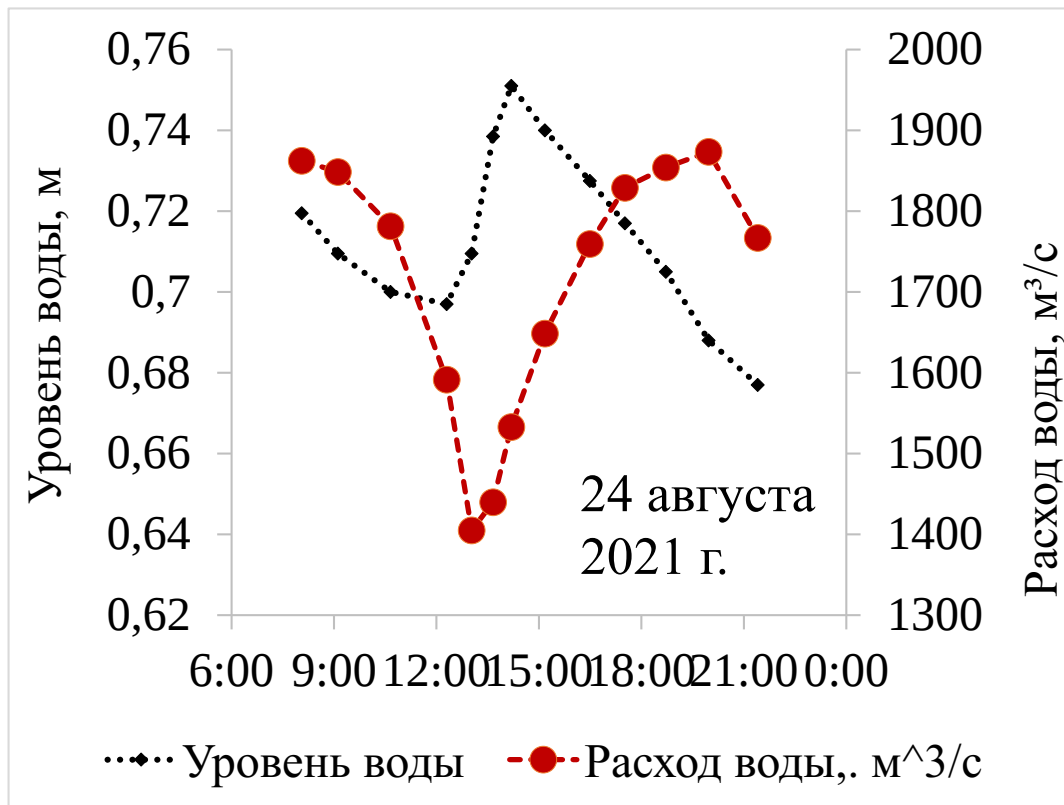
1. Влияние морских приливов на устьевых участках рек гораздо заметнее проявляется в периодическом изменении направления и скорости течения воды по сравнению с изменениями уровней воды.



Колебания **уровней** и **расходов** воды
В устье реки Лая в ходе приливного цикла



Северная Двина: Усть-Пинега



Уровень воды изменялся на 7 см.

Расход воды от 1400 м³/с до 1870 м³/с (изменение на 25%).

Результирующий расход воды за приливный цикл составил 1720 м³/с, измеренные максимальный и минимальный расход воды отличаются от него соответственно на 9 и 18 %.

В. Н. Михайлов

ГИДРОЛОГИЯ УСТЬЕВ РЕК



Издательство
Московского университета

2. Существенные вариации скоростного поля в ходе приливного цикла приводят к значимым изменениям значений гидравлического сопротивления коррективов кинетической энергии и количества движения (коэффициентов Кориолиса и Буссинеска) в уравнении движения Сен-Венана.

Уравнение движения для устьев рек обычно записывают в двух вариантах. В первом варианте в качестве основных переменных избираются уровень воды и средняя по сечению скорость течения, а уравнение движения записывается в составляющих уклона водной поверхности, т. е. в безразмерной форме:

$$-\frac{\partial H}{\partial x} = I = \frac{\alpha_1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\alpha_2 v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v |v|}{C^2 h} + \frac{h}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\tau_w}{\rho g h} + \frac{qv}{g\omega}. \quad (2.2)$$

Это уравнение есть результат обобщения обычного одномерного уравнения неустановившегося движения на условия устьев рек с дополнительным учетом переменного направления движения воды (для этого в член, учитывающий трение, вводится модуль скорости $|v|$), продольного градиента плотности $\partial \rho / \partial x$, воздействия ветра через его касательное напряжение τ_w , путевого притока q . Касательное напряжение ветра задается

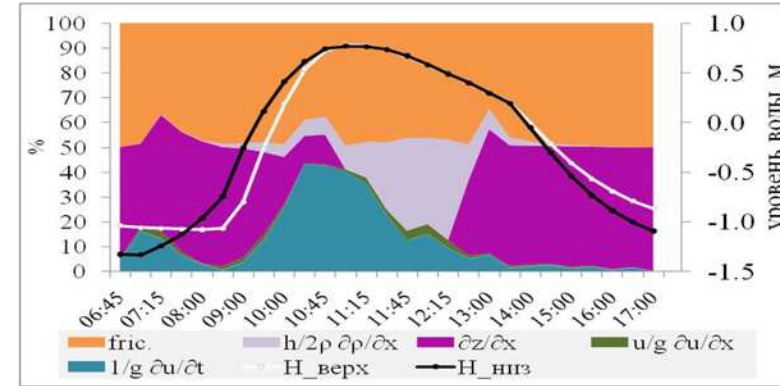
Д. М. Ман-Дзулла, Б. А. О. Кашюр

ГИДРАВЛИКА ПРИЛИВНЫХ УСТЬЕВ РЕК

Основа 1D гидродинамического моделирования - система уравнений Сен-Венана

$$\frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\alpha u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} = I - I_{mp}$$

$$\frac{\partial(u\omega)}{\partial x} + \frac{\partial\omega}{\partial t} = 0$$



Соотношение членов уравнения Сен-Венана
В ходе приливного цикла. Кянда 4.08.2016

Допущения !!!

$$\alpha = const$$

$$I_{mp.} = \frac{u^2}{C^2 R} = \frac{n^2 u^2}{R^{4/3}} = \frac{\lambda u^2}{8gR}$$

для реверсивных потоков:

$$\alpha_0 = const$$

$$I_{mp.} = \frac{u|u|}{C^2 R} = \frac{n^2 u|u|}{R^{4/3}} = \frac{\lambda u|u|}{8gR}$$

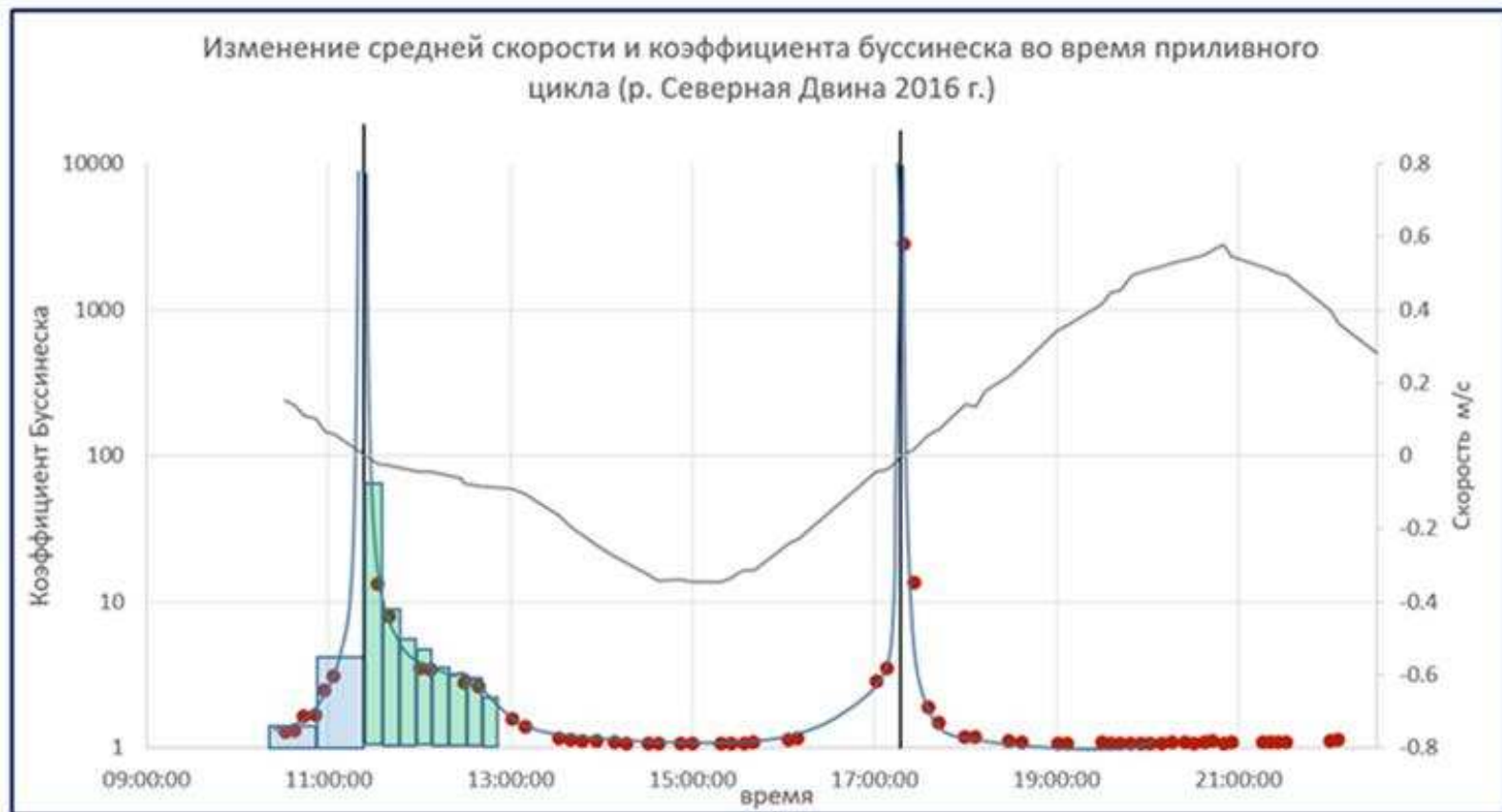
Причина «экстремально
высоких» значений
корректировок скорости

$$\frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\alpha u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} = 1 - I_{mp}$$

$$\frac{\partial(u\omega)}{\partial x} + \frac{\partial\omega}{\partial t} = 0$$

$$\alpha = 1 + 3 \frac{\int \Delta u^2 d\omega}{\bar{u}^2 \omega},$$

$$\alpha_0 = 1 + \frac{\int \Delta u^2 d\omega}{\bar{u}^2 \omega}.$$



Возможная корректировка уравнение движения

Должно быть:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial(\alpha_0 v)}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial(\alpha v)}{\partial x} + \frac{\lambda v |v|}{8gR} = J$$

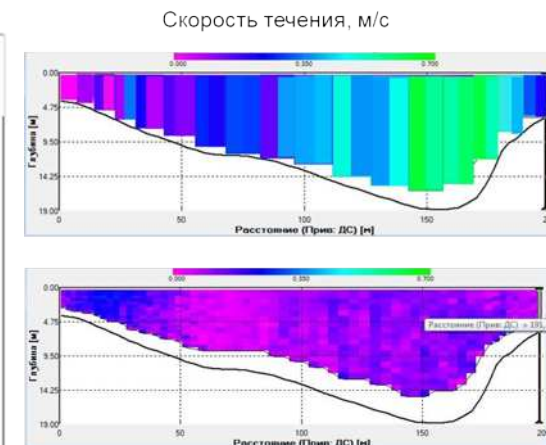
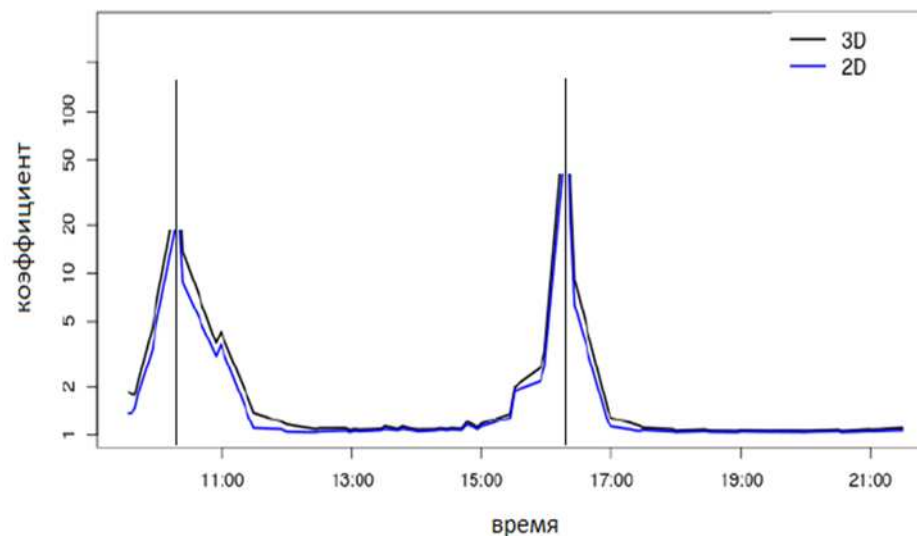
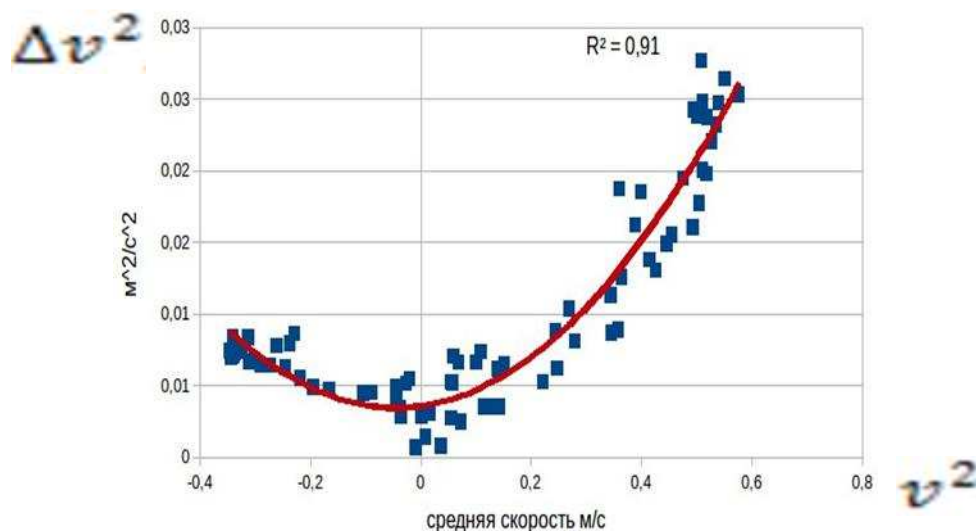
Исходя из того, что

$$\alpha_0 \neq \text{const}, \alpha_0 = \alpha_0(x, t) \quad \alpha \neq \text{const}, \alpha = \alpha(x, t)$$

$$\alpha_0 = 1 + \frac{\int \Delta v^2 d\omega}{v^2 \omega} \quad \alpha = 1 + 3 \frac{\int \Delta v^2 d\omega}{v^2 \omega} \int_{\omega} \frac{\Delta v^2 d\omega}{\omega} = \overline{\Delta v^2}$$

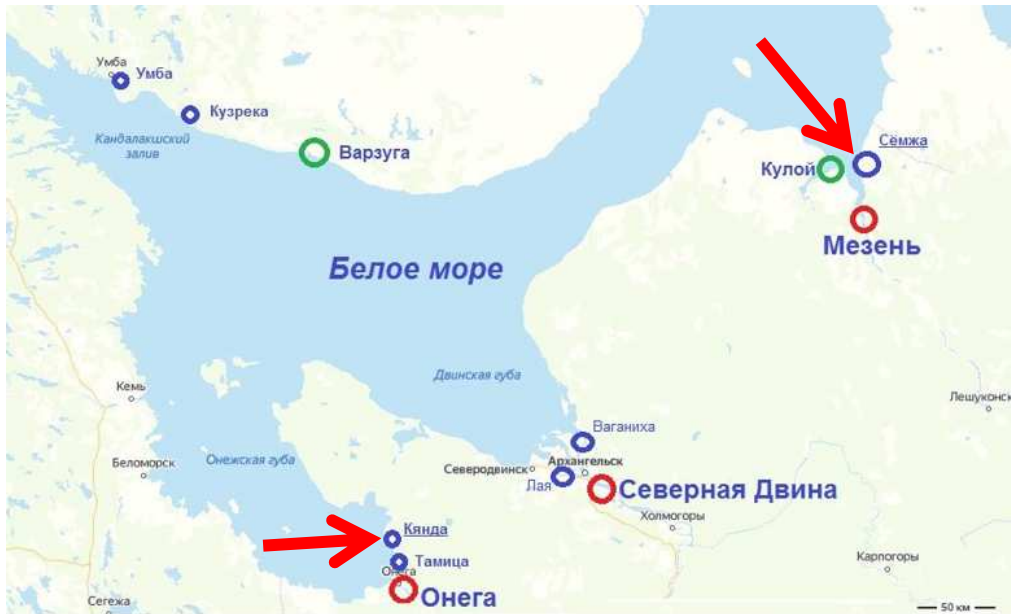
Получаем:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\Delta v^2}{v^2} \right) + \frac{3v}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Delta v^2}{v^2} \right) + \frac{\lambda v |v|}{8gR} = J$$

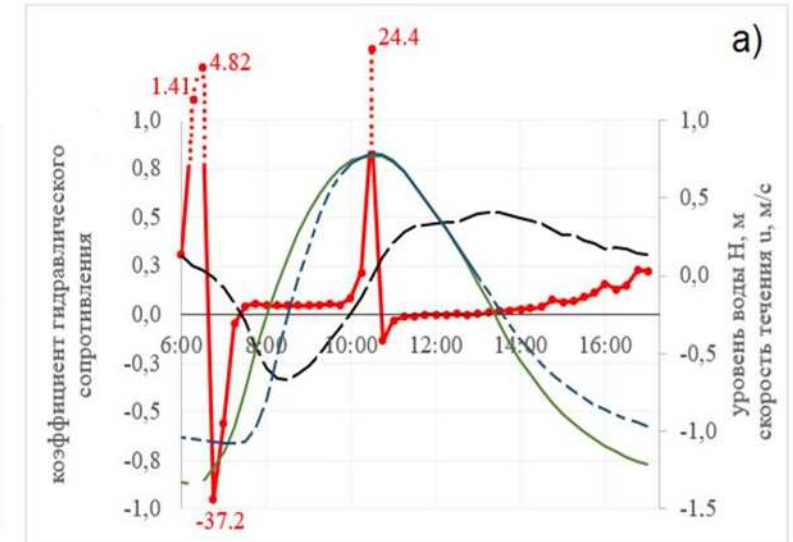
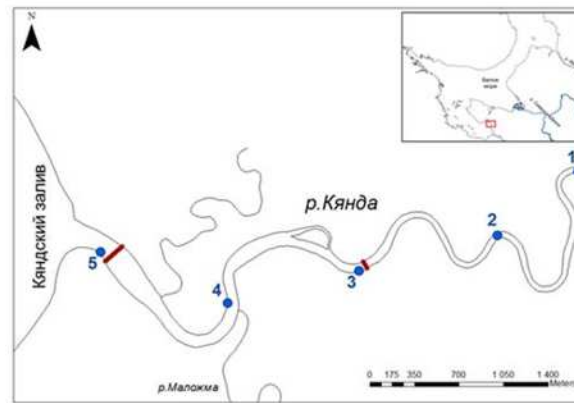


Циклические изменения гидравлического сопротивления λ в широком диапазоне значений могут отражать специфический характер обмена энергией между поступательным и вихревым движением воды

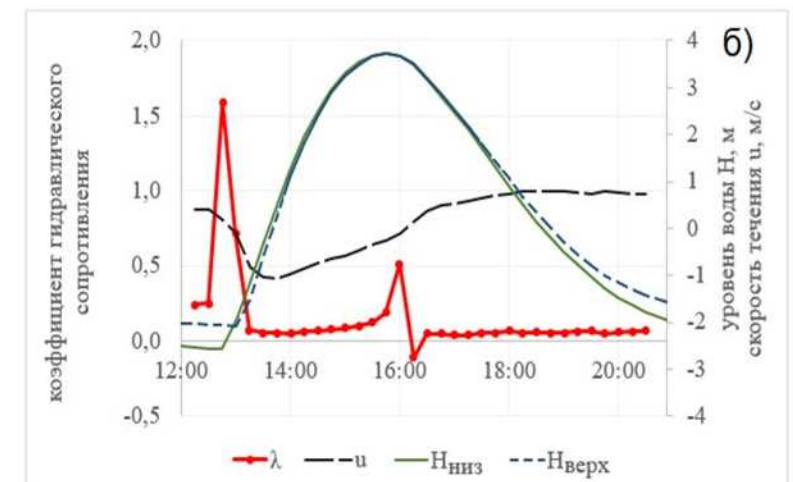
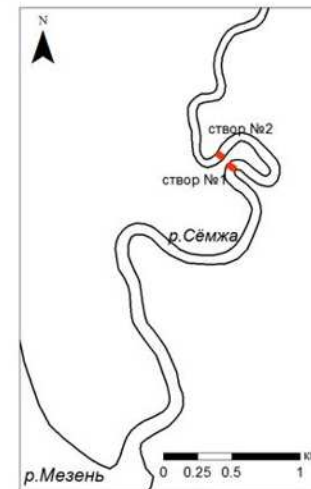
$$I_{mp.} = \frac{u^2}{C^2 R} = \frac{n^2 u^2}{R^{4/3}} = \lambda \frac{u^2}{8gR}$$



Кянда 2016



Сёмжа 2018



В.Старр «Физика явлений с отрицательной вязкостью».
М.: Мир. 1971. 261 с.

Аналогично каскаду Колмогорова: положительная турбулентная вязкость приводит к диссипации кинетической энергии среднего течения, причем эта энергия переходит в нерегулярные движения, а от них в энергию молекулярных движений и в конечном итоге преобразуется в тепло.

(стр. 23) «При наличии отрицательной турбулентной вязкости последовательность событий должна быть обратной: среднее течение получает кинетическую энергию от нерегулярных движений, а энергия среднего течения остается в определенных пределах за счет диссипативного влияния других процессов. Нерегулярные движения либо постепенно ослабевают, либо же поддерживаются **некоторыми процессами**, например систематическим преобразованием тепла в кинетическую энергию...».

Стр. 38 «... эффекты отрицательной вязкости **не могут доминировать** в стационарном режиме, так как вся кинетическая энергия нерегулярных движений была бы скоро исчерпана.» ...

Для поддержания квазистационарного режима в системе с преобладающим эффектом отрицательной турбулентной вязкости необходимо два условия:

«а) **Нерегулярные движения**, которые переносят импульс против градиентов среднего течения, должны иметь источник турбулентной кинетической энергии...

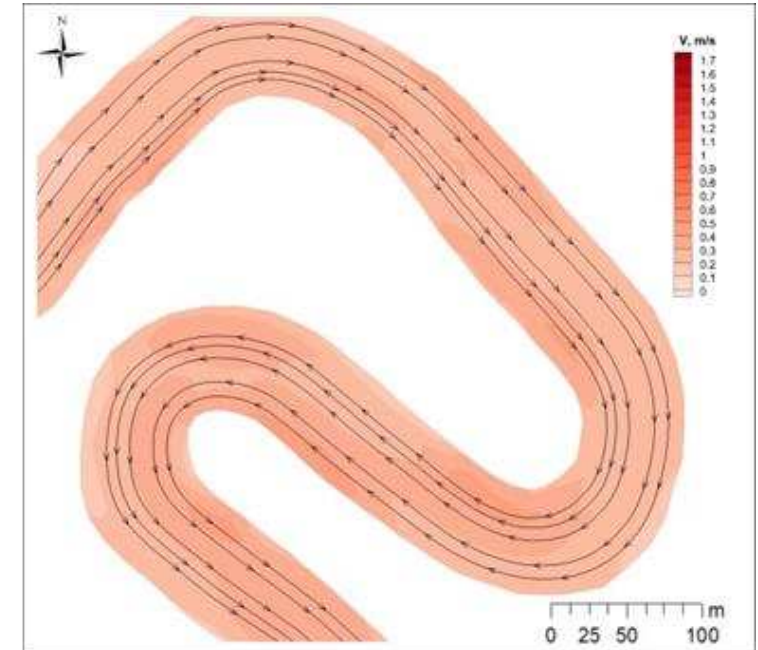
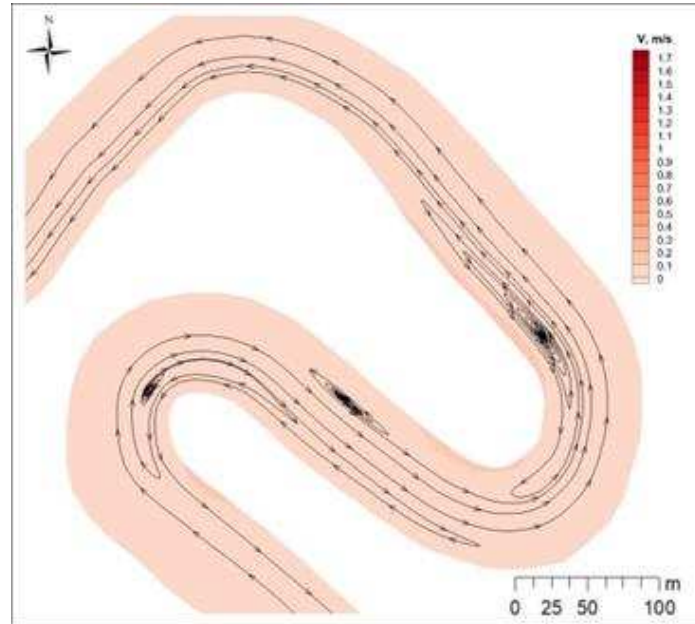
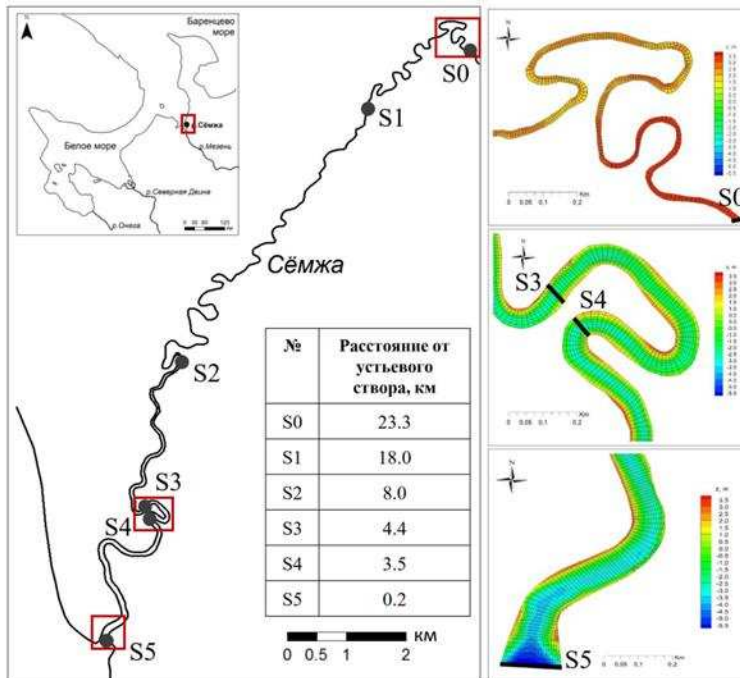
б) Среднее течение должно подвергаться некоторому виду **торможения**, чтобы не возрастать беспредельно...»

детально исследует эффекты отрицательной турбулентной вязкости главным образом в атмосферных процессах, причем не только в атмосфере Земли, но и Солнца, Юпитера и Сатурна, а также применительно к спиральным галактикам и околосолнечной туманности. Значительно меньше внимания уделено океанической циркуляции и меандрам Гольфстрима, а о приливных устьях упоминается лишь вскользь.

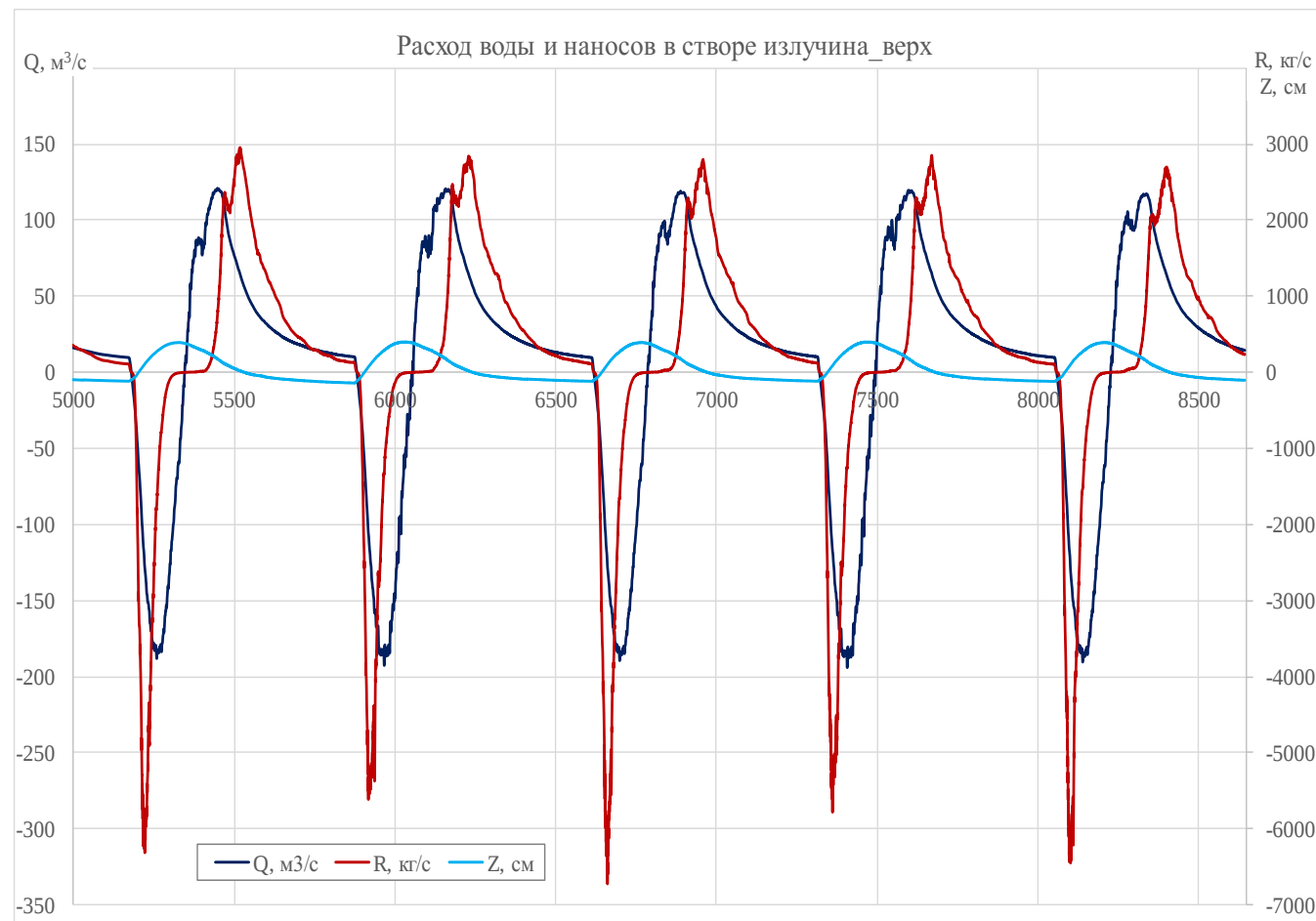
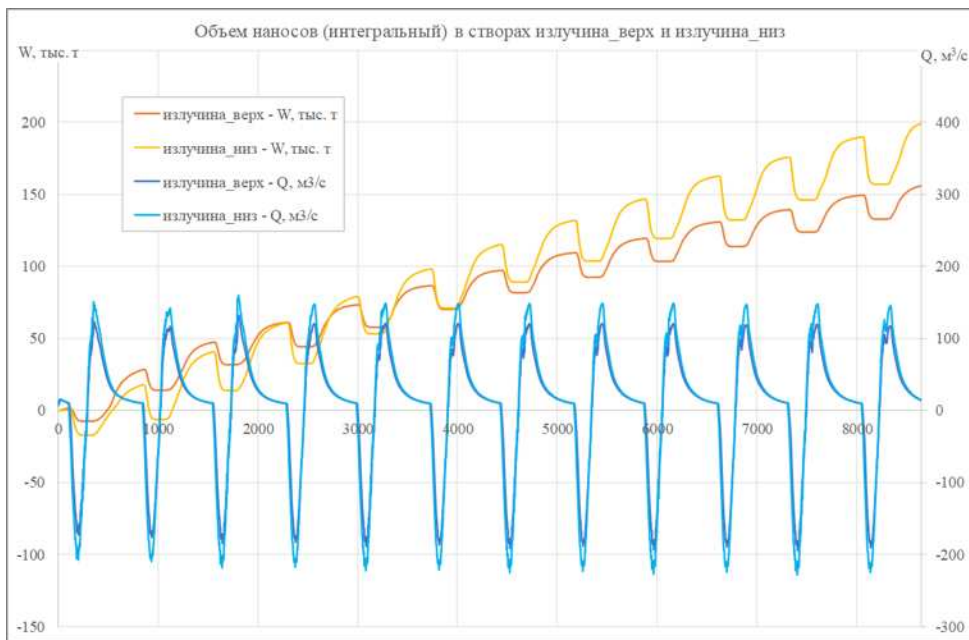
Стр. 167: «Перенос импульса происходит по направлению градиента средней скорости, что соответствует положительной турбулентной вязкости. Однако при некоторых условиях **приливные течения** ... могут изменить направление градиента среднего течения на обратное, тогда как перенос импульса происходит по-прежнему вниз, создавая таким образом **эффект отрицательной вязкости**»



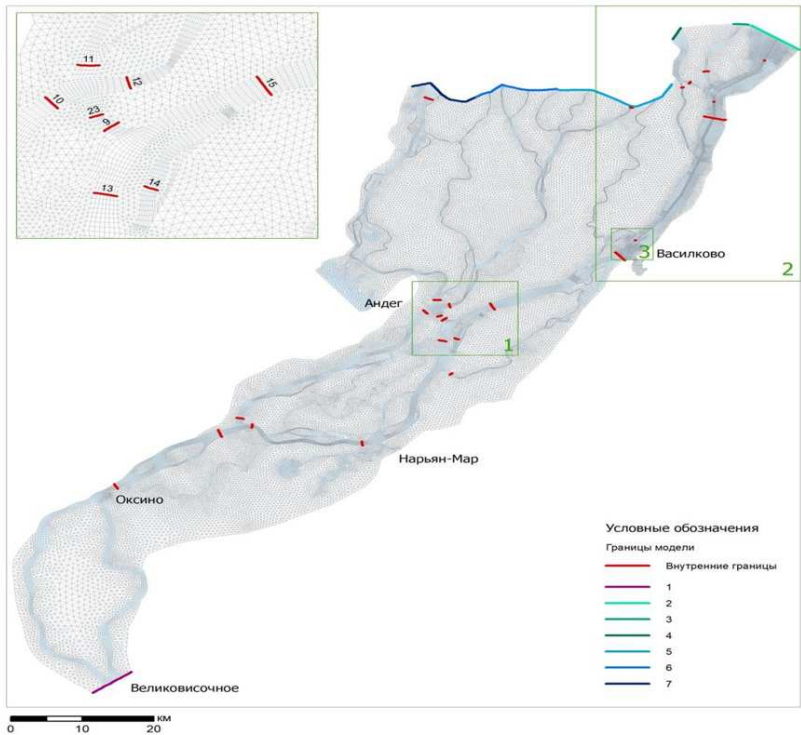
Вихревые движения водной массы
при смене направления течений
на приливных участках рек
в натуре и при моделировании
(STREAM_2D)



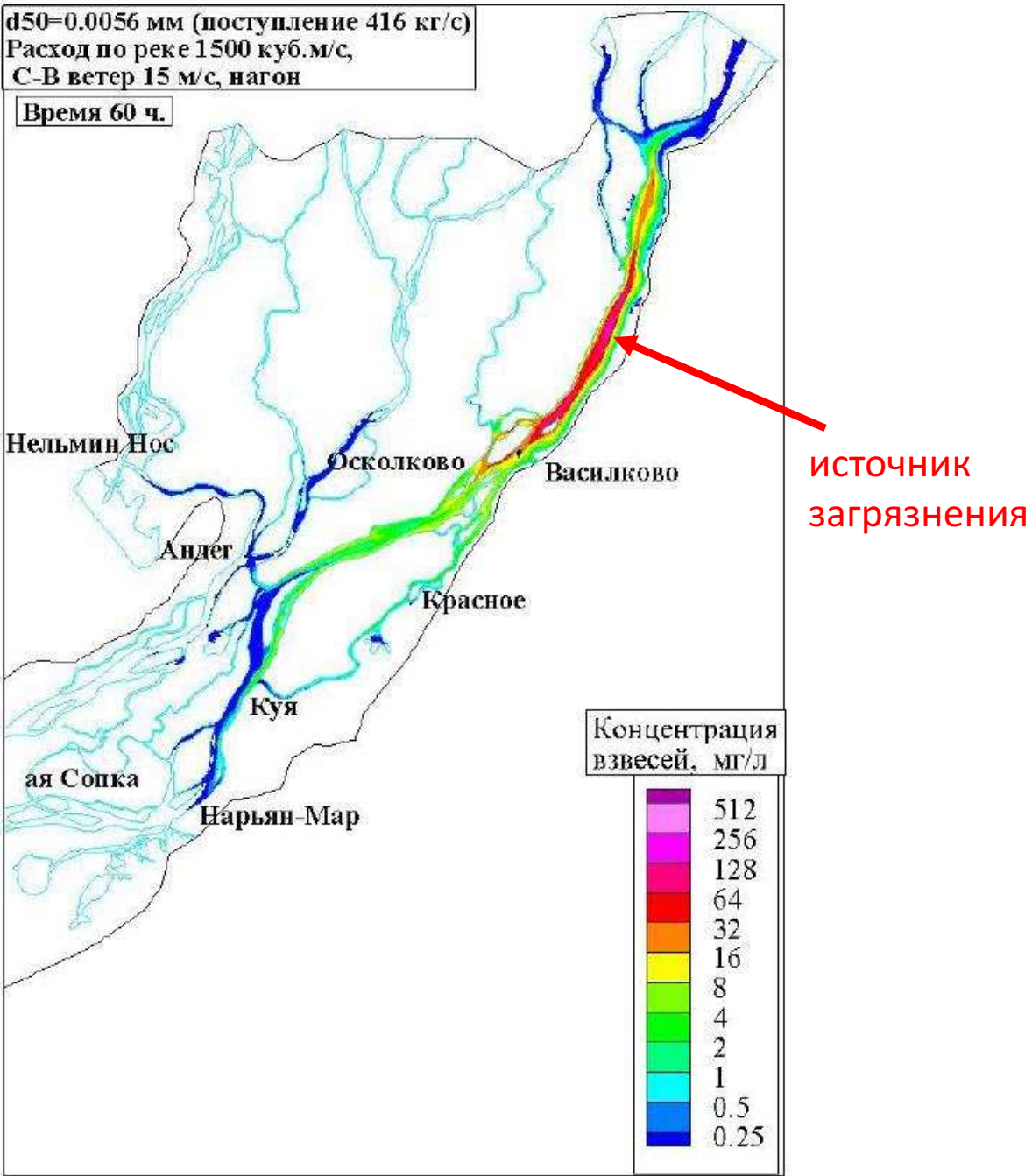
3. Специфический гидродинамический режим приливных участков рек отражается в «странном» перемещении там наносов и загрязнителей.



Перемещение водных масс, наносов и загрязнителей в приливных дельтах может происходить в любом направлении.



2D модель устья Печоры



Ну а перспектива – это люди
квалифицированные, умелые
и полные энтузиазма



за последние 10 лет через наши экспедиции
(включая зимние НСО) прошло более 50 студентов и
аспирантов географического факультета МГУ,
защищены 2 кандидатские диссертации, 5 магистерских
(плюс 4 в производстве)

Спасибо! и да здравствует МГУ ☺