СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

РНФ Российский научный фонд

Межгодовая изменчивость площади шельфовых вод в северо-западной области Черного моря по данным спутникового зондирования

Кириленко Наталия Федоровна,

Евстигнеев Владислав Павлович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Цель и задачи исследования

Цель работы: разработать алгоритм восстановления площади трансформированных речных вод на СЗШ по данным спутникового зондирования и обосновать оптический критерий их границы.

Задачи:

- рассчитать положение гидрофронта Дуная по простой физической модели плюма (Yankovsky, Chapman 1997);
- определить значение R443/555 на внешней границе плюма и проверить его по изохалине 17,5 psu;
- восстановить пропуски месячных полей коэффициентов яркости методом DINEOF для последующей оценки площади трансформированных вод на шельфе;
- построить шкалу R443/555 для вод плюма, шельфа и открытого моря;
- оценить многолетнюю изменчивость среднегодовой и отдельно майской (весеннее половодье рек) площади вод с R443/555 < 1.

Материалы исследования

- GlobColour L3 – суточные и месячные поля нормированных коэффициентов яркости моря NRRS на 412, 443 и 555 нм (1997-2026 гг.);
- гидрологический массив – суточный расход ($м^3/с$) р.Дунай на гидропосту Чатал за период 1921-2021 гг.;
- реанализ Черного моря CMEMS (BLKSEA_MULTIYEAR_PHY_007_004) – суточный массив солёности верхнего расчётного уровня (0,5 м) за период 1993-2021 гг.;
- реанализ ERA5 – суточные массивы ветровых характеристик за период 1993-2026;
- GEBCO – батиметрия дна Черного моря.

Модель речного плюма

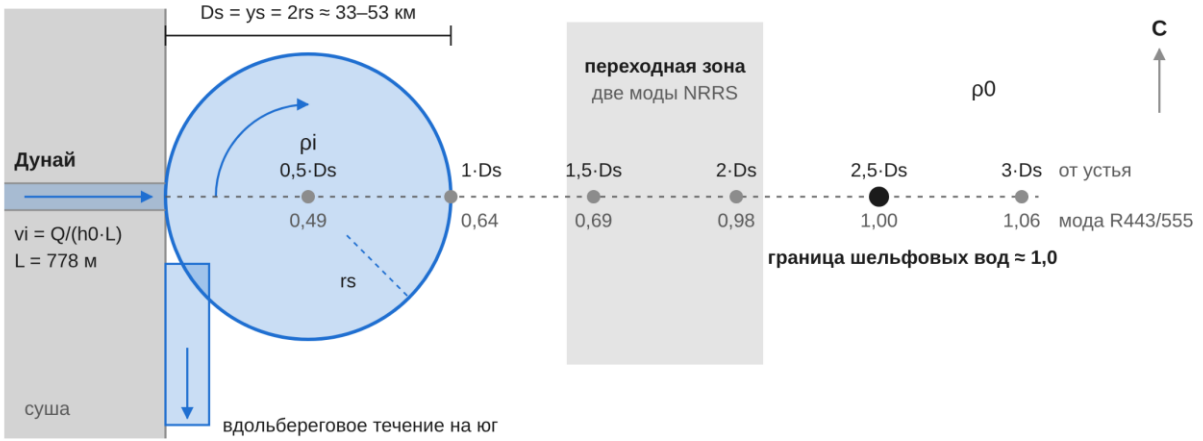
Ds — морская граница поверхностной линзы, м;
Rs — радиус линзы, м;

Q – суточный расход Дуная, м³/с;
L – ширина устьевой области, м;
ρ_0, ρ_i – плотность вод шельфа и в устьевой зоне, кг/м³;
v – скорость течения в устье, м/с;
h_0 – глубина устья

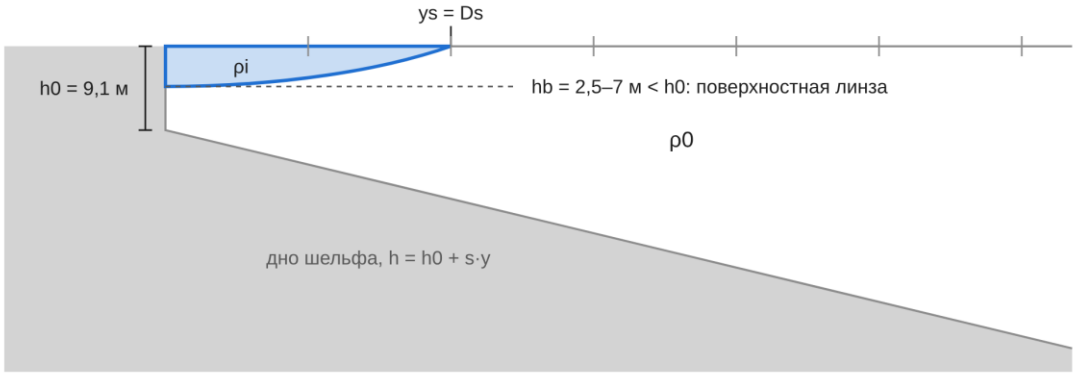
Плюм Дуная поверхностный: линза растекается у поверхности до Ds

По схеме Yankovsky & Chapman (1997, рис. 2) с параметрами р.Дунай и области отбора NRRS

а Горизонтальная плоскость



б Разрез вдоль линии отбора (вертикальный масштаб растянут)



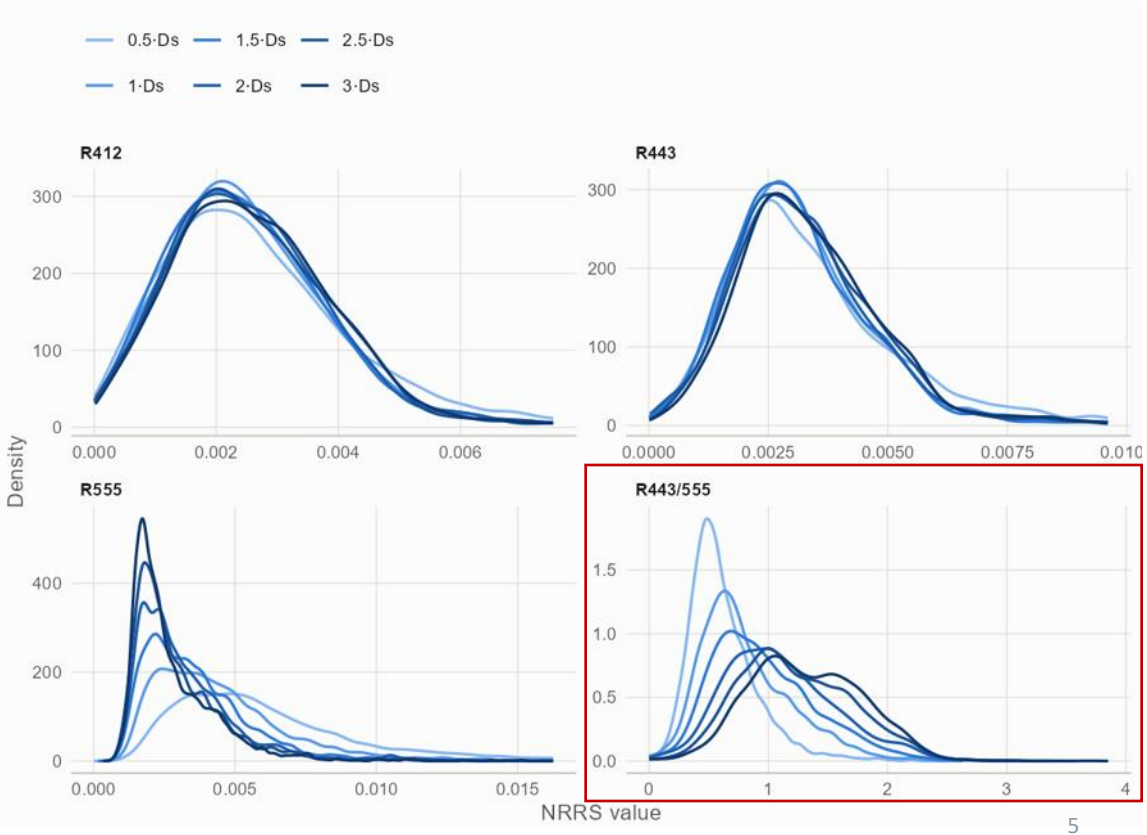
hb < h0 при всех наблюдаемых суточных расходах, т.е. речной плюм поверхностный и растекается до ys.

Изменение яркости NRRS с удалением от устья р.Дунай

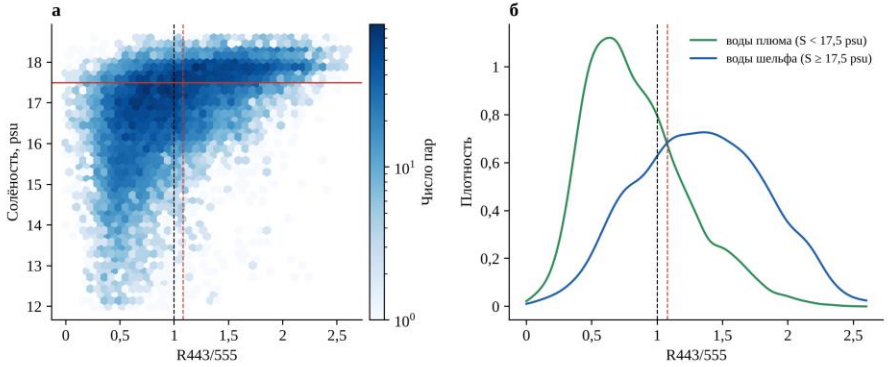
Плотности распределения всех каналов на шести расстояниях от устья

Бутстреп-оценка доверительных интервалов мод распределений показал, что отношение яркостей R443/555 имеет самую устойчивую моду на четырёх из шести расстояниях и сильнее всех каналов реагирует на изменение расстояния, поэтому лучше всего разделяет воды плюма и шельфа.

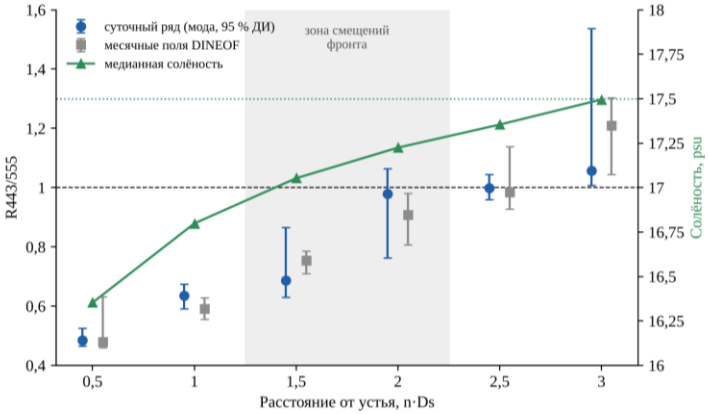
R443 - второй по надёжности канал.



Граница плюма Дуная: R443/555 = 1 на 2–2,5 Ds



Индекс R443/555 vs соленость слоя по CMEMS (0,5–3 Ds, 1997–2021 гг.):
(а) совместное распределение; (б) плотности распределения индекса в разных водах



Мода индекса R443/555 по суточному ряду / DINEOF-реконструкция и медианная соленость поверхностного слоя по реанализу Черного моря CMEMS в зависимости от расстояния от устья

71–89 км

внешняя граница при медианном расходе (2–2,5 Ds; диапазон 65–133 км)

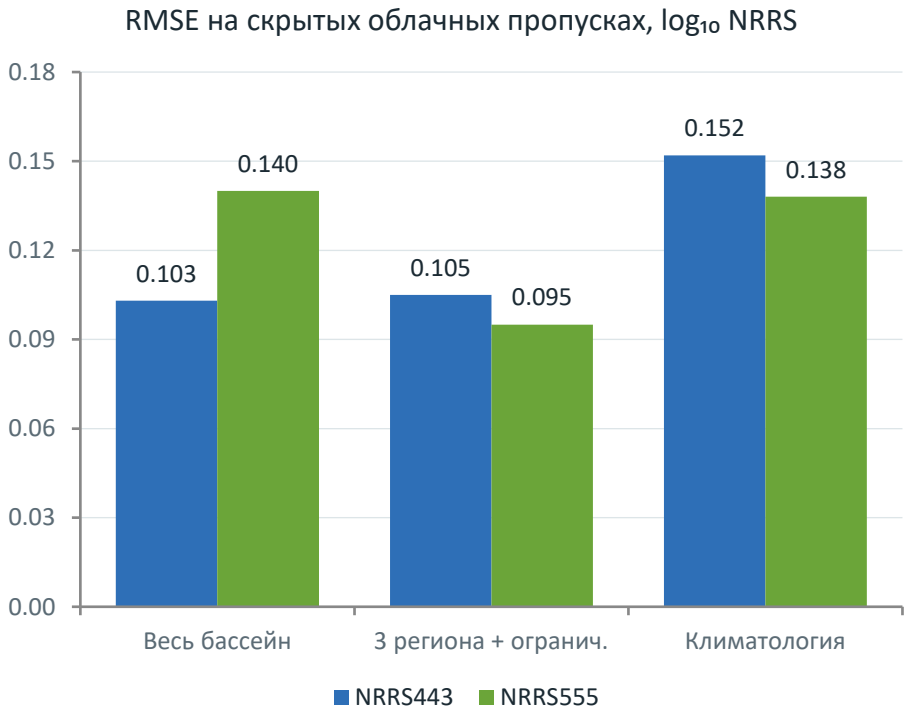
1,00 (0,96–1,04)

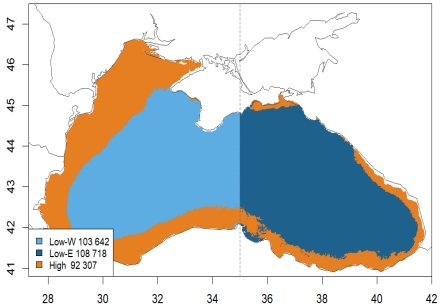
мода на 2,5 Ds: устойчива, подтверждена по данным реконструкции DINEOF (r = 0,985)

порог 1,08

разделяет воды S < 17,5 и ≥ 17,5 psu (CMEMS); изохалина 17,5 psu в среднем на рас-нии 2,55 Ds

Восстановленные месячные поля NRRS методом DINEOF





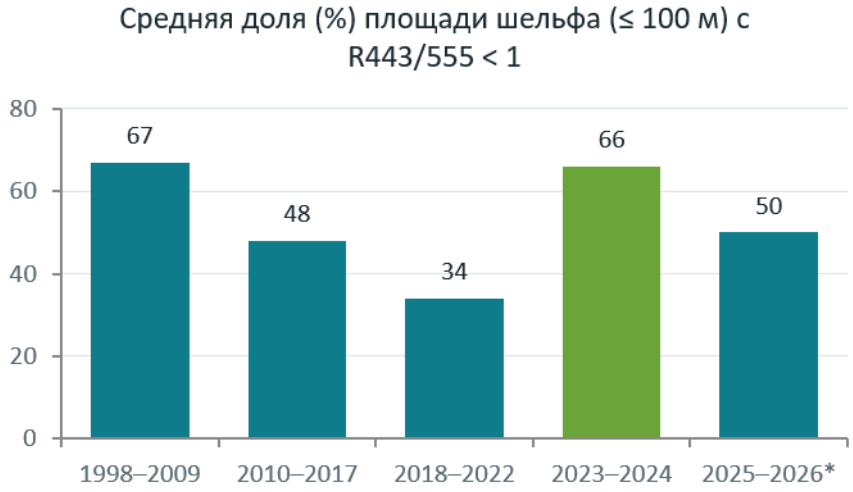
Регионы: Low-W, Low-E (открытое море, граница 35° в. д.) и High (шельф и побережье)

9,1 / 7,4 %
медианная ошибка (443 / 555 нм)

≈ −⅓
ошибки относительно климатологии

348 мес. × 304,6 тыс.
узлов сетки ~1 км на канал, 1997–2026 гг.; восстановленные значения помечены флагом QC

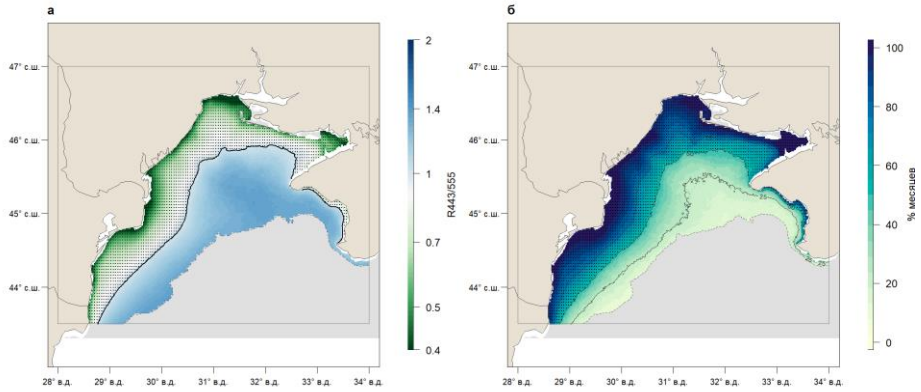
Площадь вод с R443/555 < 1 снизилась вдвое к 2021 г.



* 2026 г. – январь-август

Тренд: –17 %
за 10 лет, 1998–2022 гг. (p < 0,001)

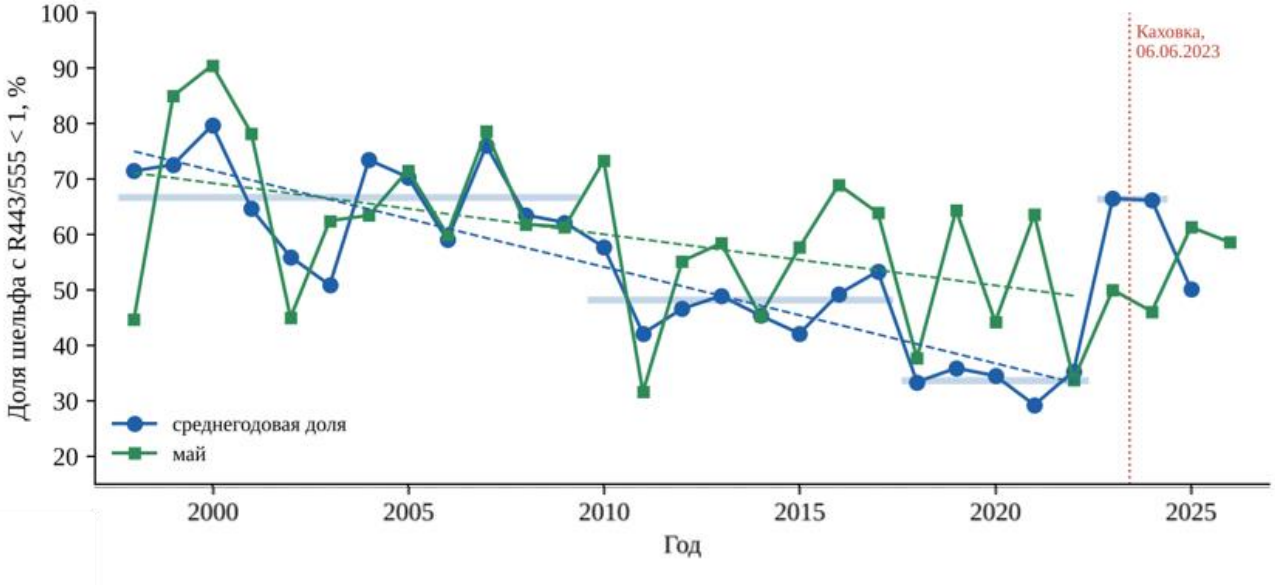
29 %
минимум ряда – 2021 г.



а – многолетнее среднее R443/555; б – доля месяцев с R443/555 < 1

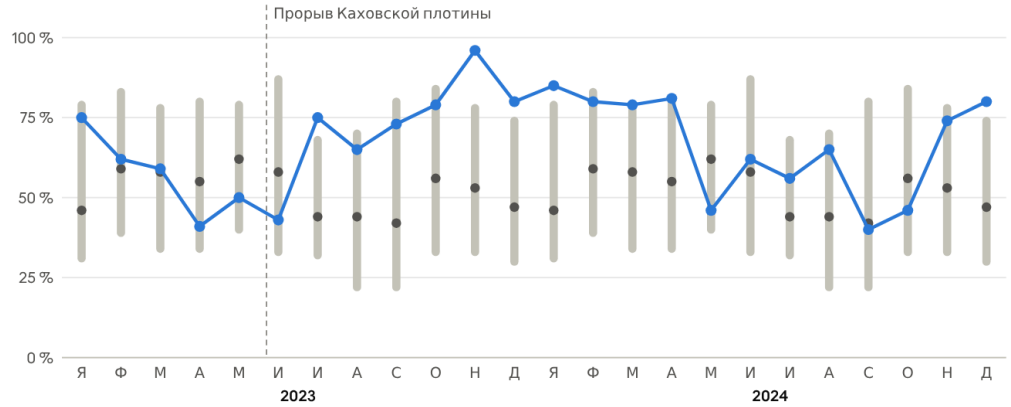
- Зона прибрежной полосы Дунай – Днестр – Днепр ниже 1 в > 90 % месяцев
- Сезонность секторов противоположна: Дунай – максимум в мае (72 %), Днепро-Бугский приустьевой район – в августе (89 %)

Многолетняя изменчивость трансформированных вод



Среднегодовая доля (%) площади шельфа с R443/555 < 1 и доля в мае (весеннее половодье рек), 1998-2026 гг.
(штриховые линии – линейные тренды за 1998-2022 гг., горизонтальные полосы – средние за периоды)

2023 г.: скачок после прорыва Каховской ГЭС



Месячная доля вод на шельфе с R443/555 < 1 в 2023-2024 гг. (синяя линия) и норма 1998-2022 гг. (медиана, 10–90-й процентили)

43 → 75 %
июнь → июль 2023 г.

96 %
ноябрь 2023 г. – рекорд

10 мес.
аномалия: июль 2023 – апрель 2024

Что произошло

- 6 июня 2023 г.: ≈ 14,4 км³ воды из Каховского водохранилища
- Днепро-Бугский приустьевой район – 98-100 % с R443/555 < 1 в июле-ноябре; придунайский район 37 → 73 %
- Аномалия длилась 10 месяцев – влияние пресной воды, биогенов и органики
- 2025-2026 гг. – возврат к медиане (50-51 %)

Выводы и дальнейшие шаги

Граница плюма

R443/555 = 1,0–1,1 на 2–2,5 Ds (71–89 км) — индекс мониторинга шельфовых вод

Поля NRRS

Трехрегиональная DINEOF-схема реконструкции полей -> ошибка реконструкции на треть ниже климатологического восстановления

Речные воды

Доля шельфа с трансформированными водами: 67 → 34 % (1998–2022), Выявлен скачок до 75 % после прорыва Каховской ГЭС

Аномалия 2023 года

Продолжительность аномалии – 10 месяцев.
Рекорд распространения трансф.вод – 96% в ноябре 2023 г.

Тренд

−17 % в 10 лет по оценке за период 1998-2022 гг. ($p < 0,001$)
г.

Далее

Анализ связи площади трансформированных вод с явлением придонной гипоксии