



Оценка области воздействия на газообмен водоем-атмосфера в прибрежной зоне: на примере водного участка полигона “Карбон – Поволжье”

Согачев А.Ф.^{1,2,*}, Репина И.А.^{2,3}, Кожевникова М.А.⁴, Усманов Б.М.⁴, Прохоров В.Е.⁴

¹Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Казанский (Поволжский) федеральный университет, Казань, Россия

* andreysogachev@gmail.com

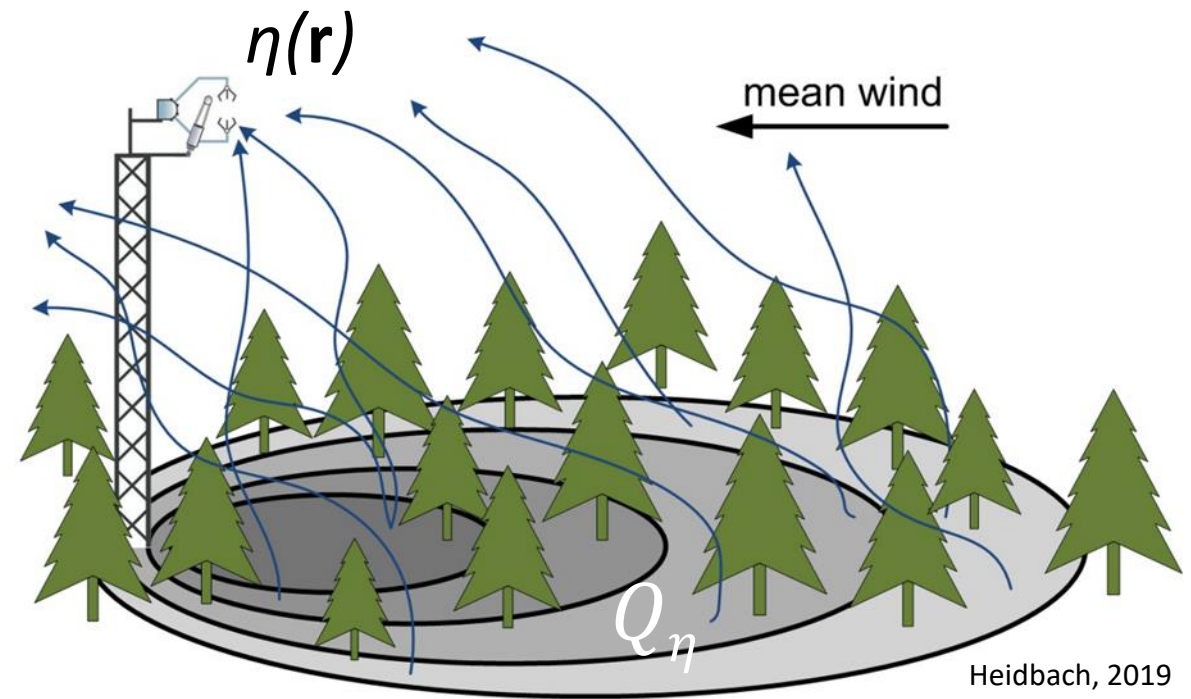
Концепция футпринта (*footprint*)

Футпринт описывает «поле зрения» (зону охвата) ЕС (*eddy covariance*)-системы и формально является передаточной функцией между измеренным значением потока η и источником Q_η на подстилающей поверхности в области R

$$\eta(\mathbf{r}) = \int_{\mathfrak{R}} Q_\eta(\mathbf{r} + \mathbf{r}') f(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}'$$

Конфигурация и протяженность футпринта зависит от

- Высоты измерения
- Свойств поверхности
- Характеристики атмосферного потока (скорость ветра, направление ветра, турбулентность, ...)



Переменные по времени

(Wilson and Swaters 1991; see also Pasquill and Smith 1983)

Для чего нужен футпринт?

- **Чтобы описать основную область влияния на ЕС измерения**
Обеспечить оптимальное размещения дополнительных инструментов/датчиков (например, спектрометра)
- **Для интерпретации временных рядов измеренных потоков**
Определить изменчивость потока, вызванную вариациями зон охвата
Проверить согласованность зон охвата спектрометра и ЕС-системы
- **Для оценки репрезентативности**
Убедиться что измерения отражают средние свойства композиции исследуемых видов земного покрова
- **Для масштабирования**
Интерполировать точечные данные на локальный или региональный масштаб

(Leclerc and Foken;2014; Klsujn et al. 2018)

Когда футпринт не нужен...



...и нужен

Водный участок «Саралы» полигона «Карбон – Поволжье»

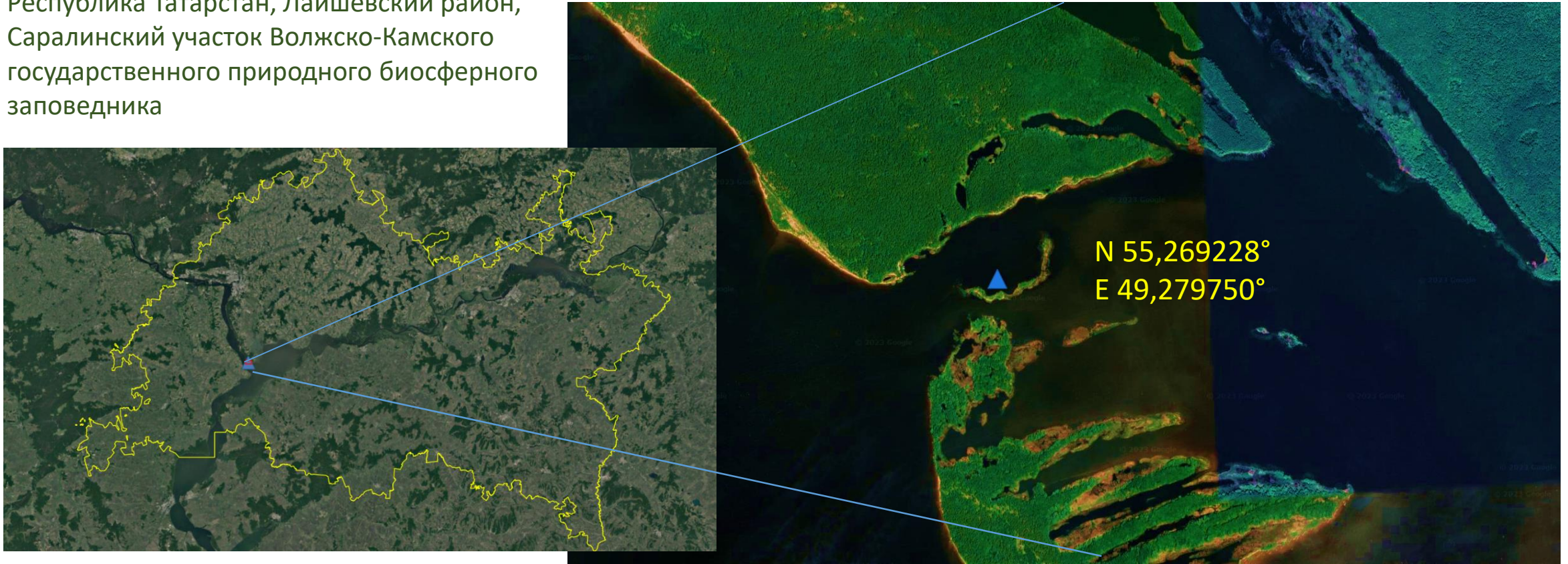


Полигон “Карбон – Поволжье”: цели

Модель цикла углерода в экосистемах мелководий Куйбышевского водохранилища

Местоположение:

Республика Татарстан, Лаишевский район,
Саралинский участок Волжско-Камского
государственного природного биосферного
заповедника



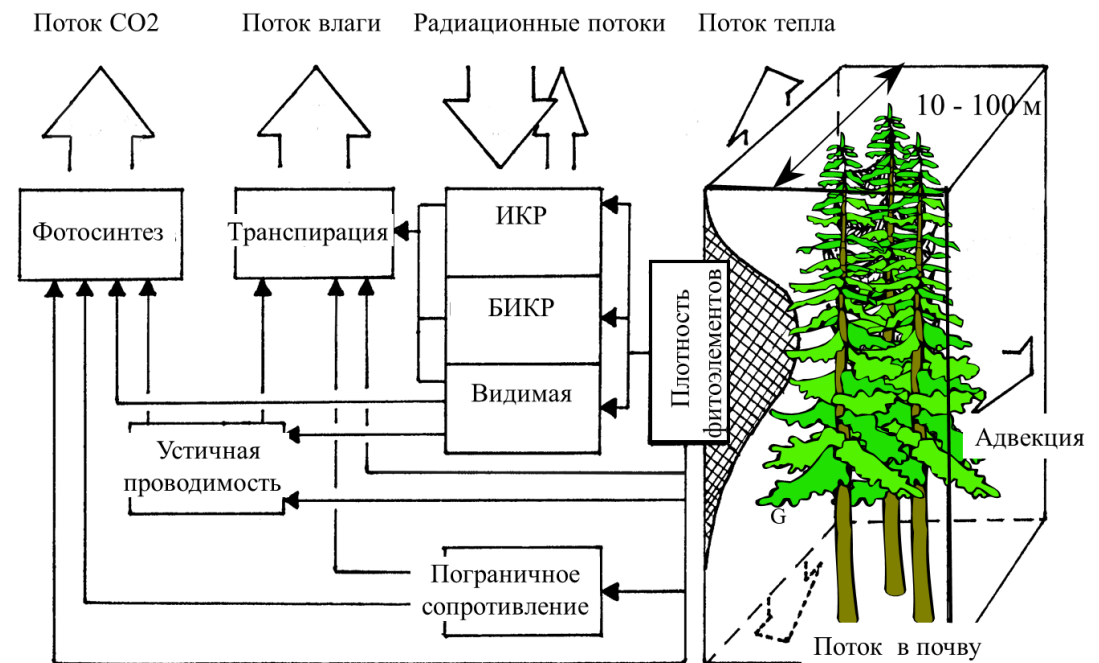
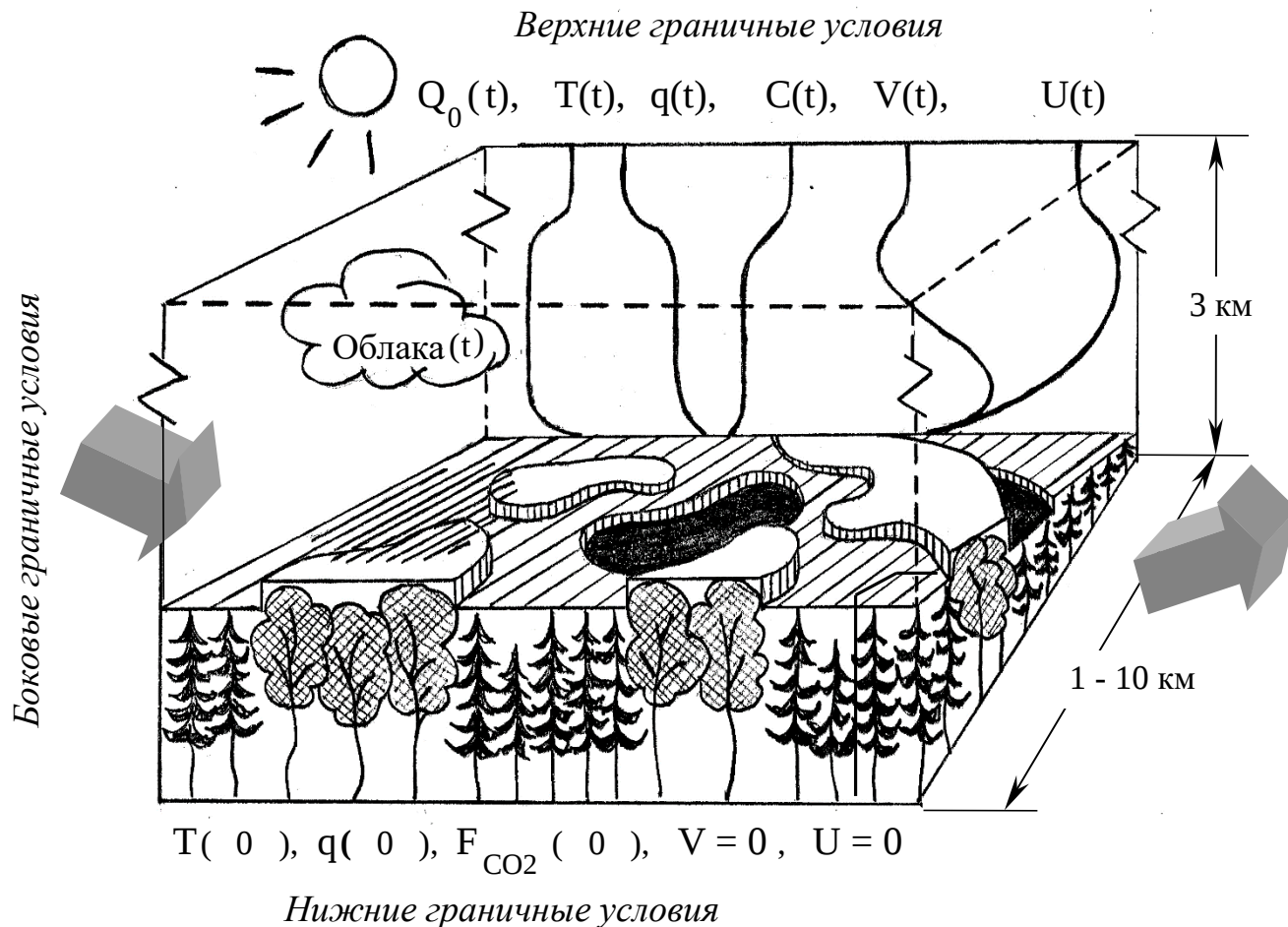
Итогом изучения процессов миграции углерода будет уточнение вклада водохранилищ в баланс парниковых газов для корректировки региональных коэффициентов его расчёта для территории Российской Федерации.

Модели футпринта

- Аналитические модели
- Лагранжевы стохастические модели (LS)
- Модели на основе метода замыкания (RANS)
- Модели на основе вихре-разрешающего моделирования (LES)

Метод: модель SCADIS (RANS)

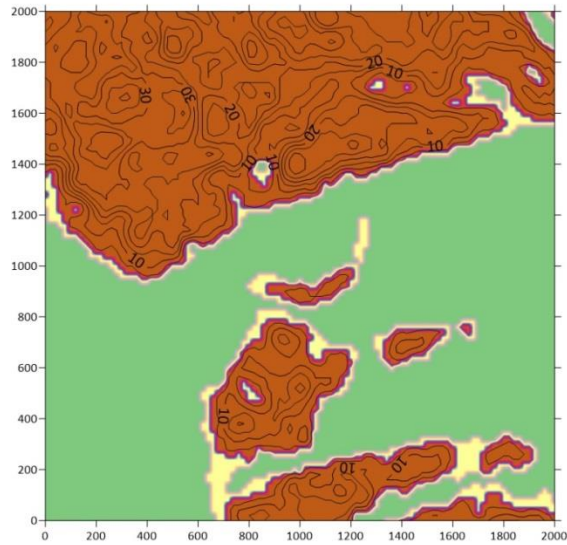
SCADIS (**s**calar **d**istribution) это трехмерная модель высокого пространственного разрешения, описывающая процессы в слое растительность - пограничный слой атмосферы (ПСА).



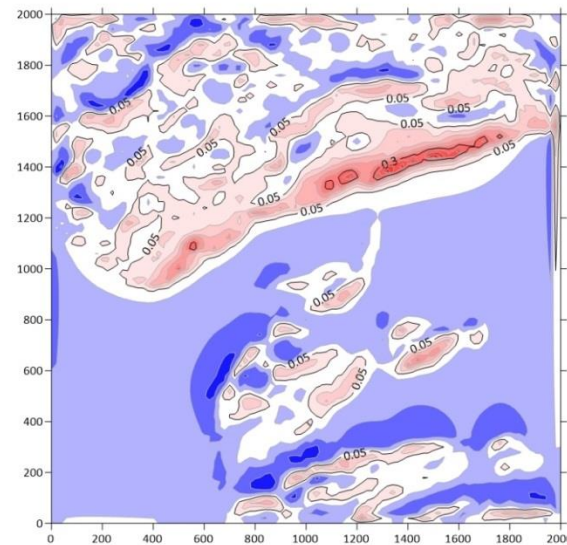
(Sogachev et al., 2002)

Результаты моделирования воздушного потока

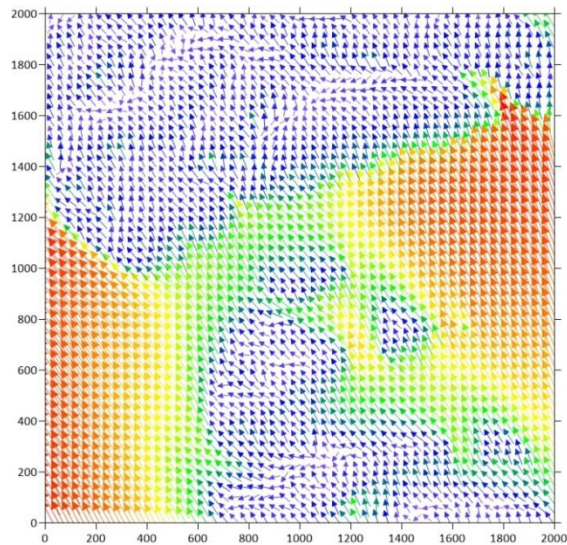
Topo+landuse (3 classes)



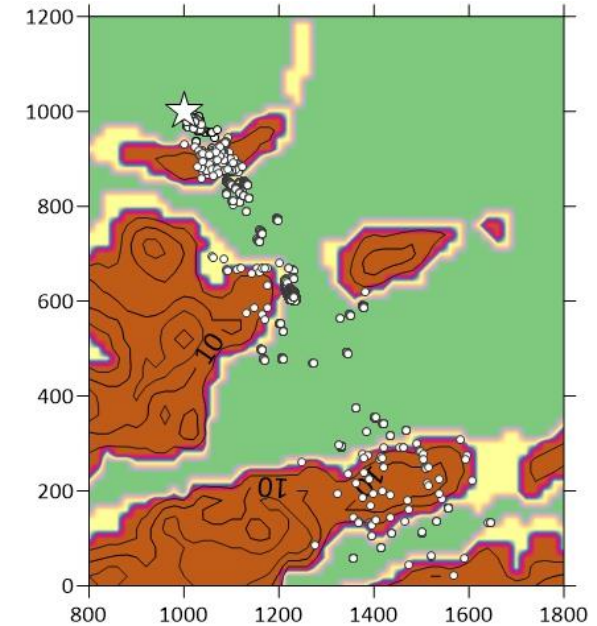
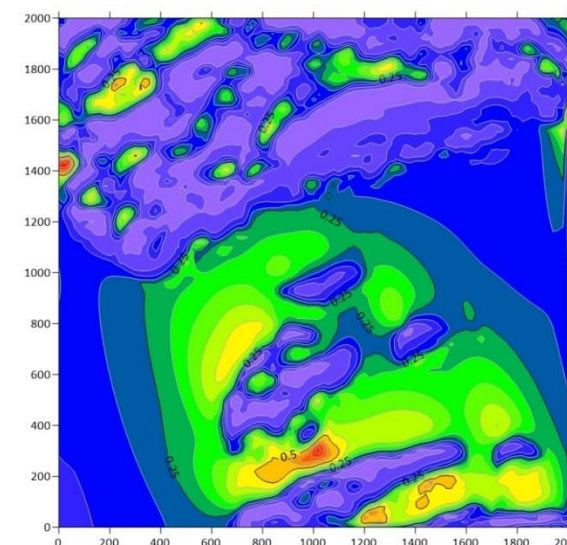
W (m s⁻¹)



Wind (m s⁻¹)



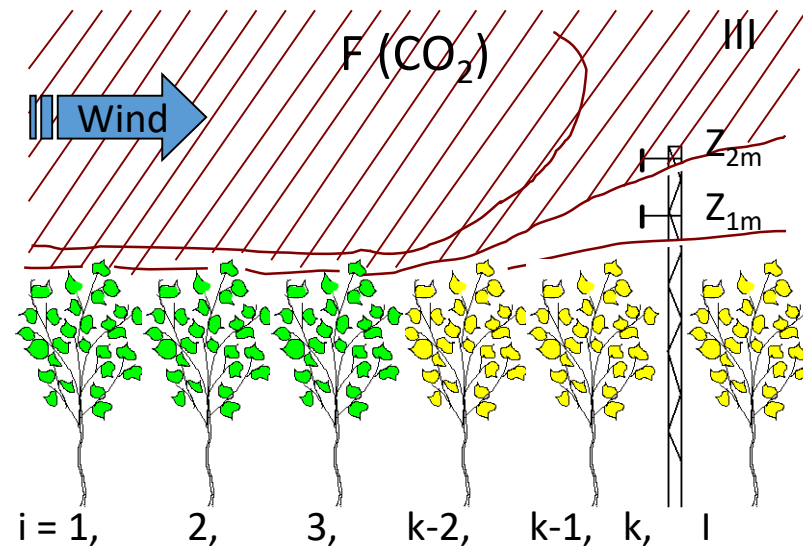
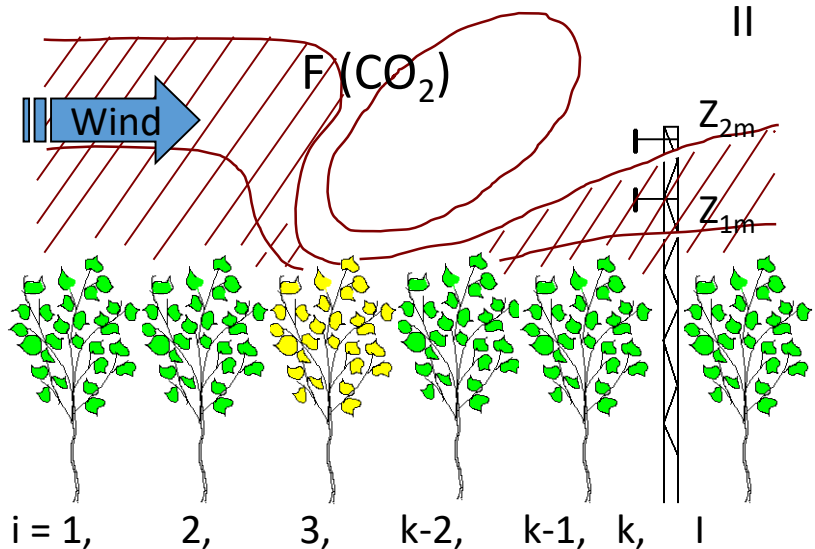
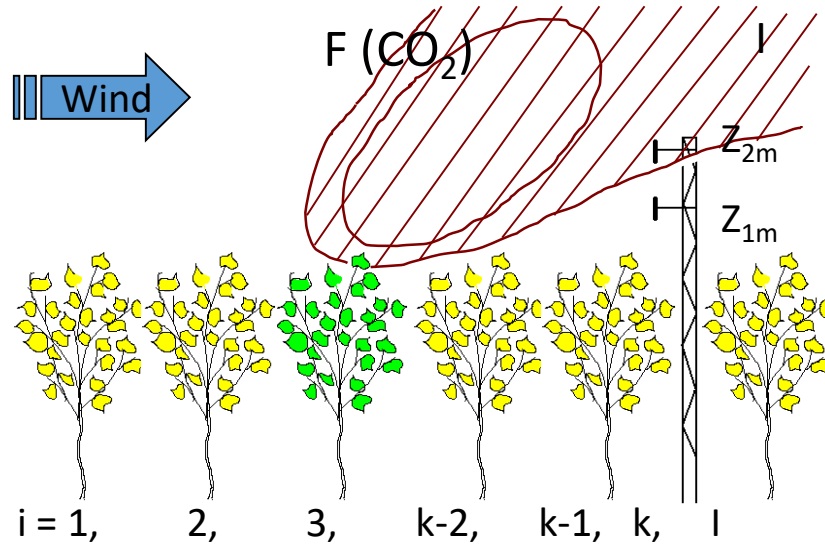
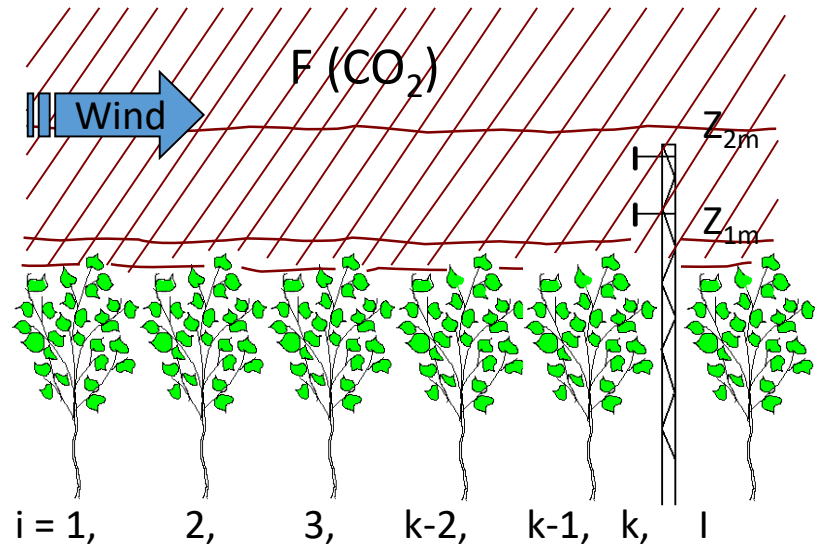
TKE (m² s⁻²)



Попытка оценки футпринта LS методом.

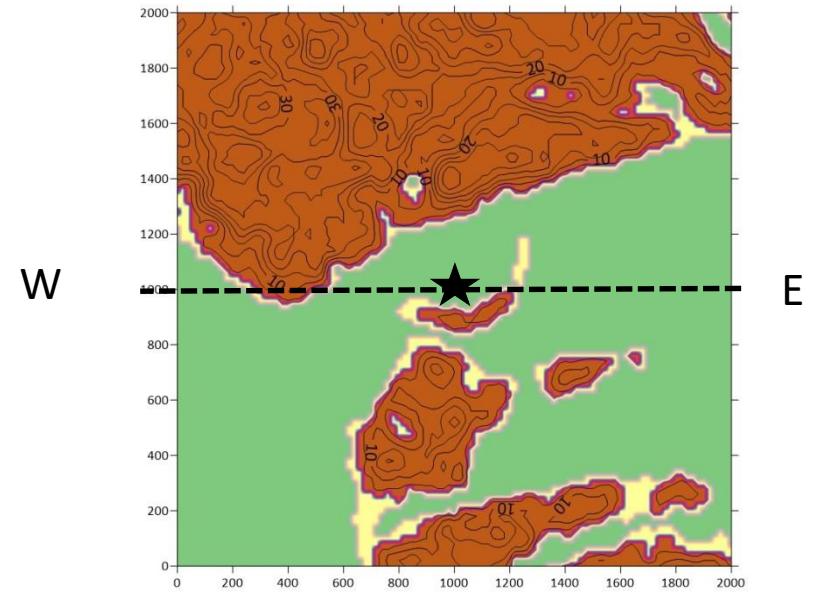
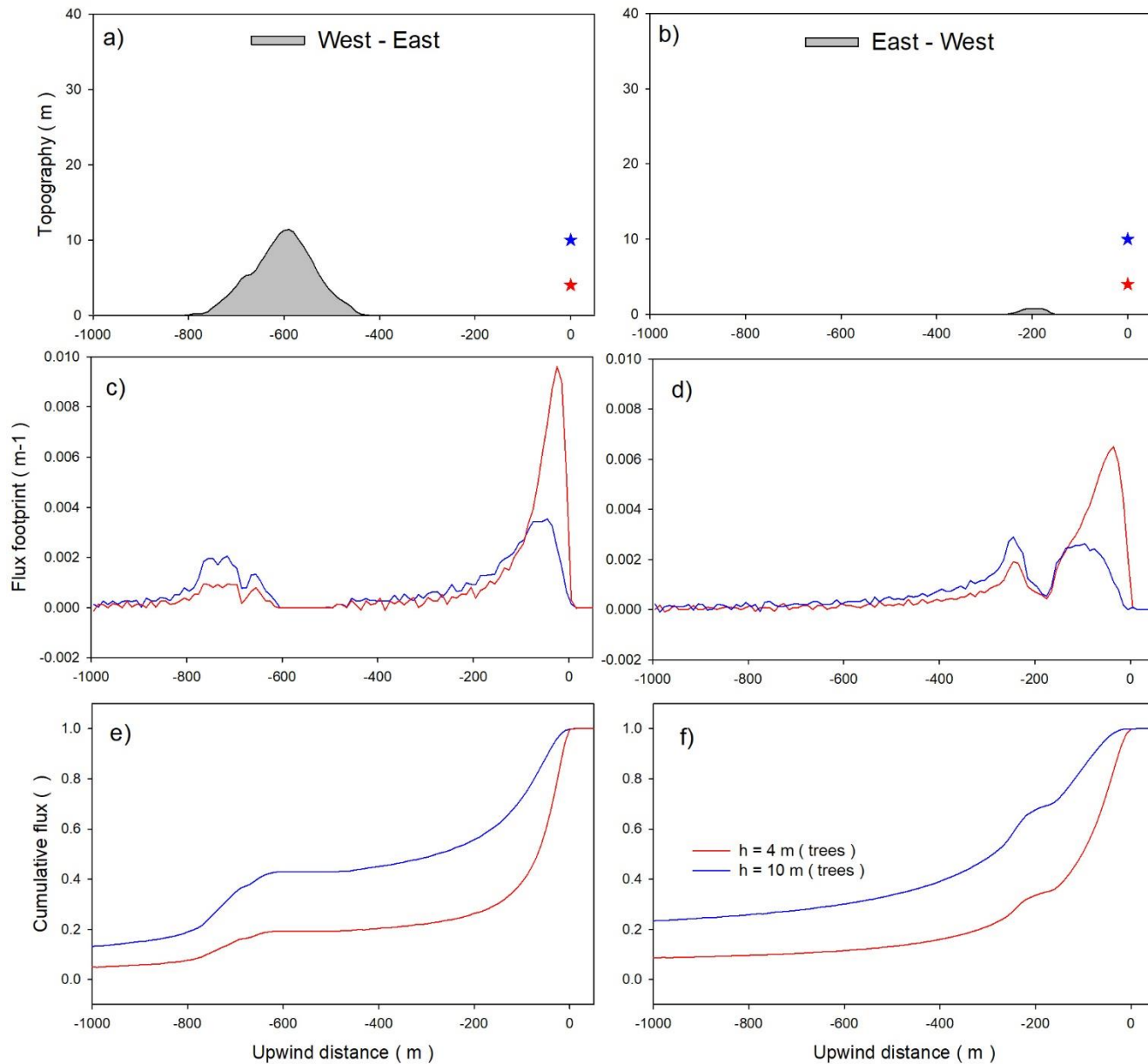
Топография, типы поверхности и основные характеристики воздушного потока на высоте 10 м над поверхностью для южного геострофического ветра.

Оценка футпринта в SCADIS



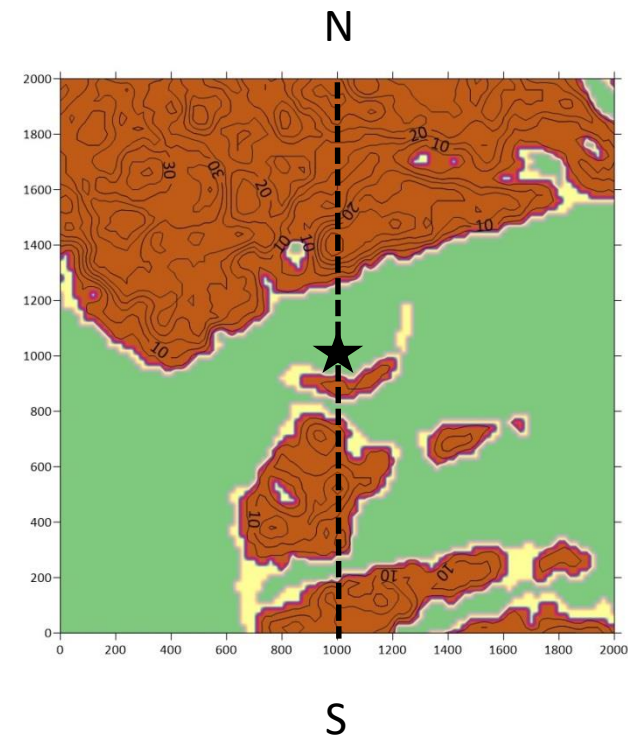
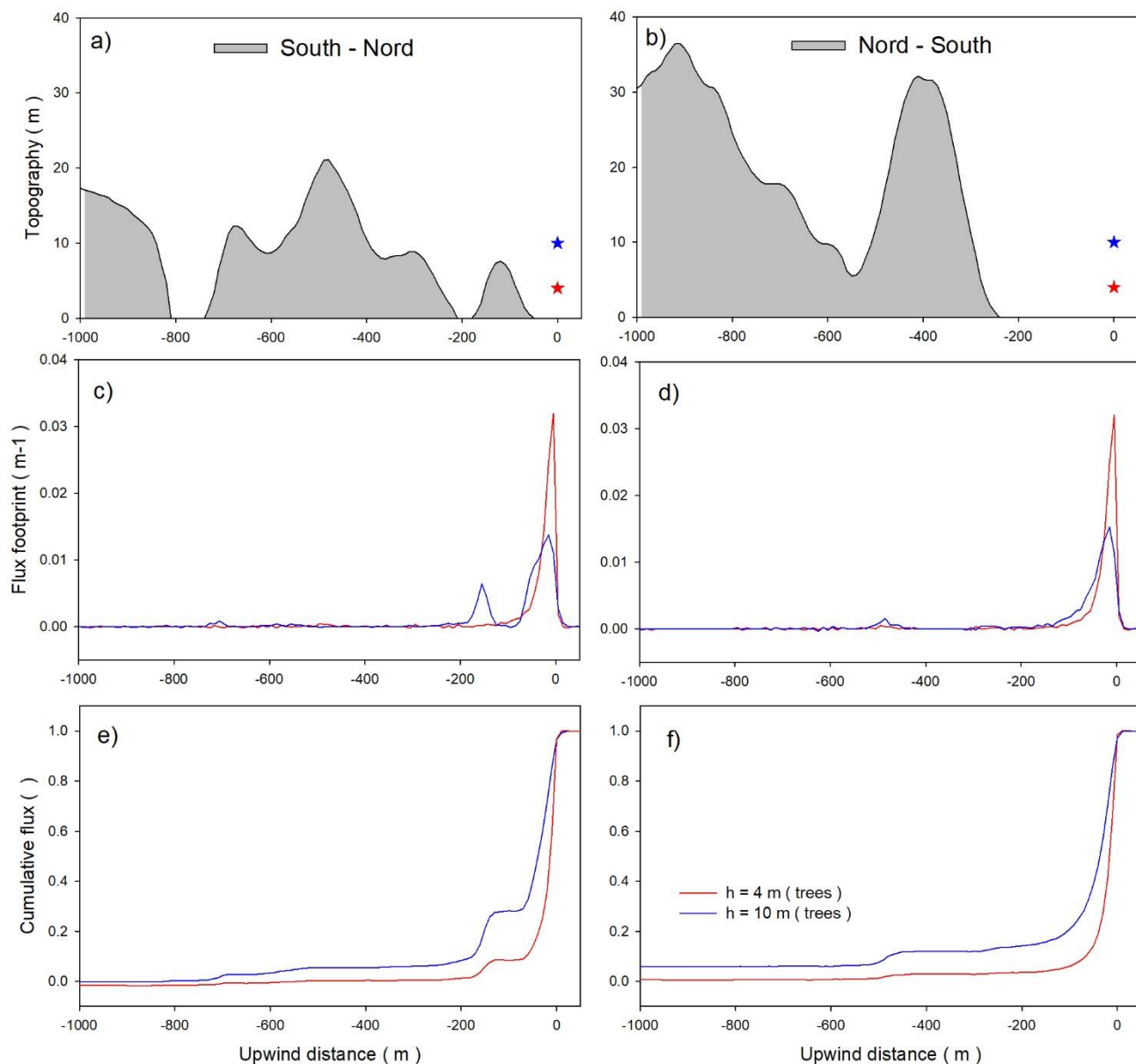
i показывает текущую координату внутри модельного пространства с I узлов. k координата исследуемого узла (расположение измерительной мачты). Z_1 и Z_2 обозначают высоты для которых определяется «footprint». Заштрихованная область показывает область высокой интенсивности вертикального потока субстанции.

Результаты: (W – E), (РП: h = 15 м, LAI = 3)



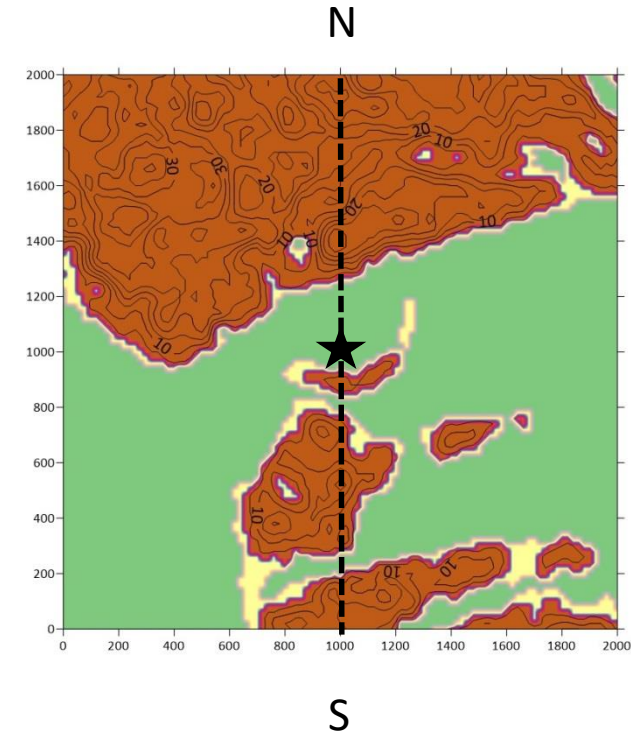
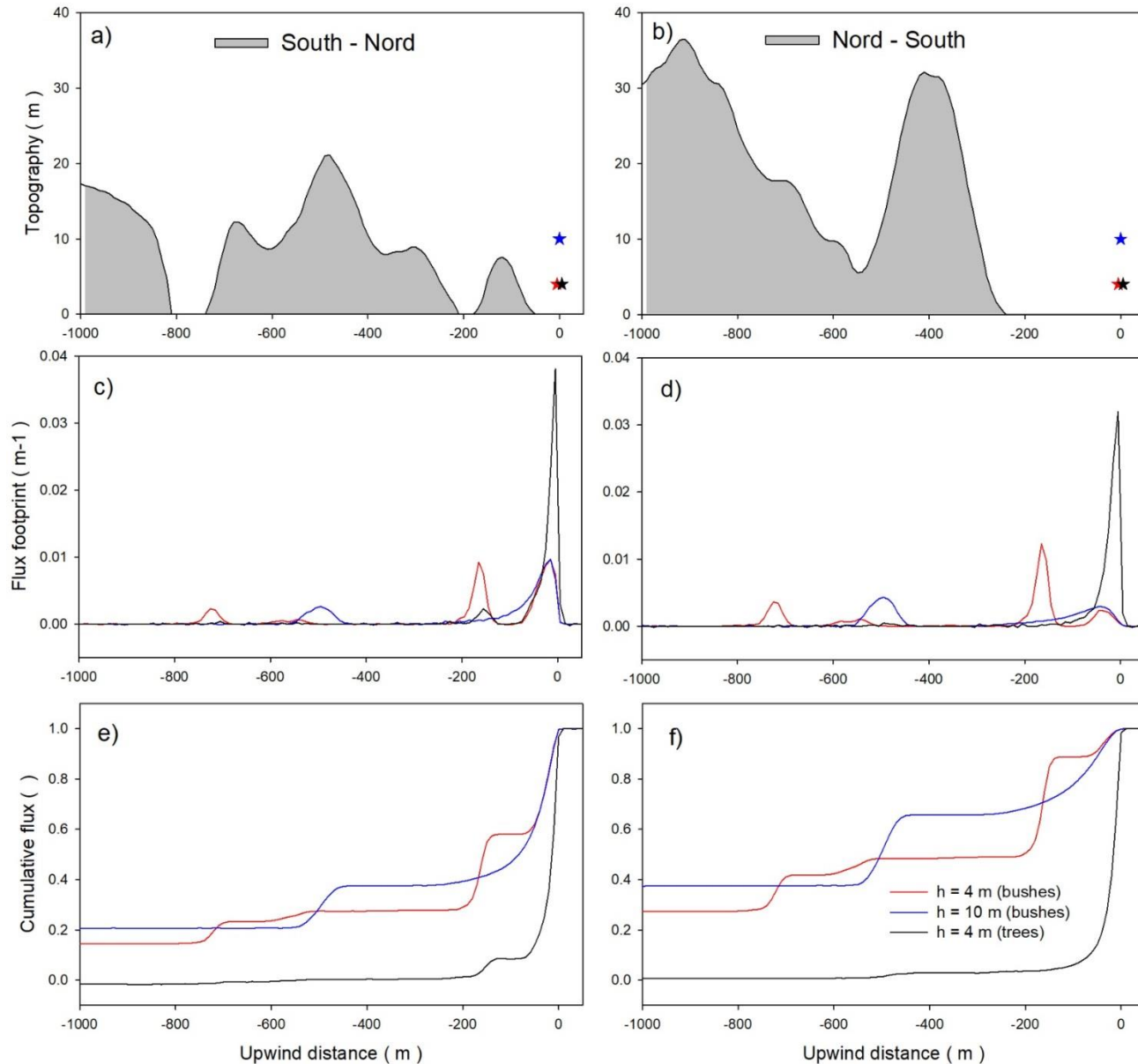
Футпринты и кумулятивные потоки для сенсоров на разных высотах 4 и 10 м (звездочки) для западного и восточного направлений ветра.

Результаты: (N – S), (РП: $h = 15$ м, LAI = 3)



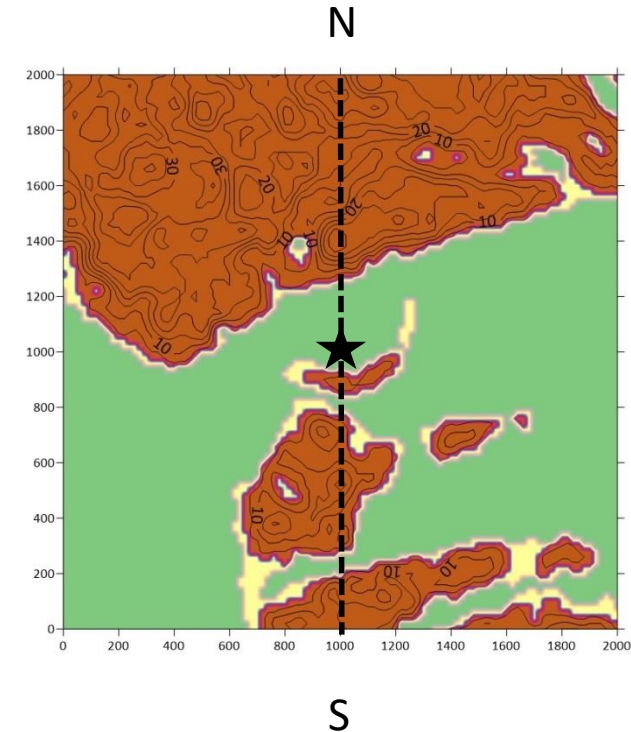
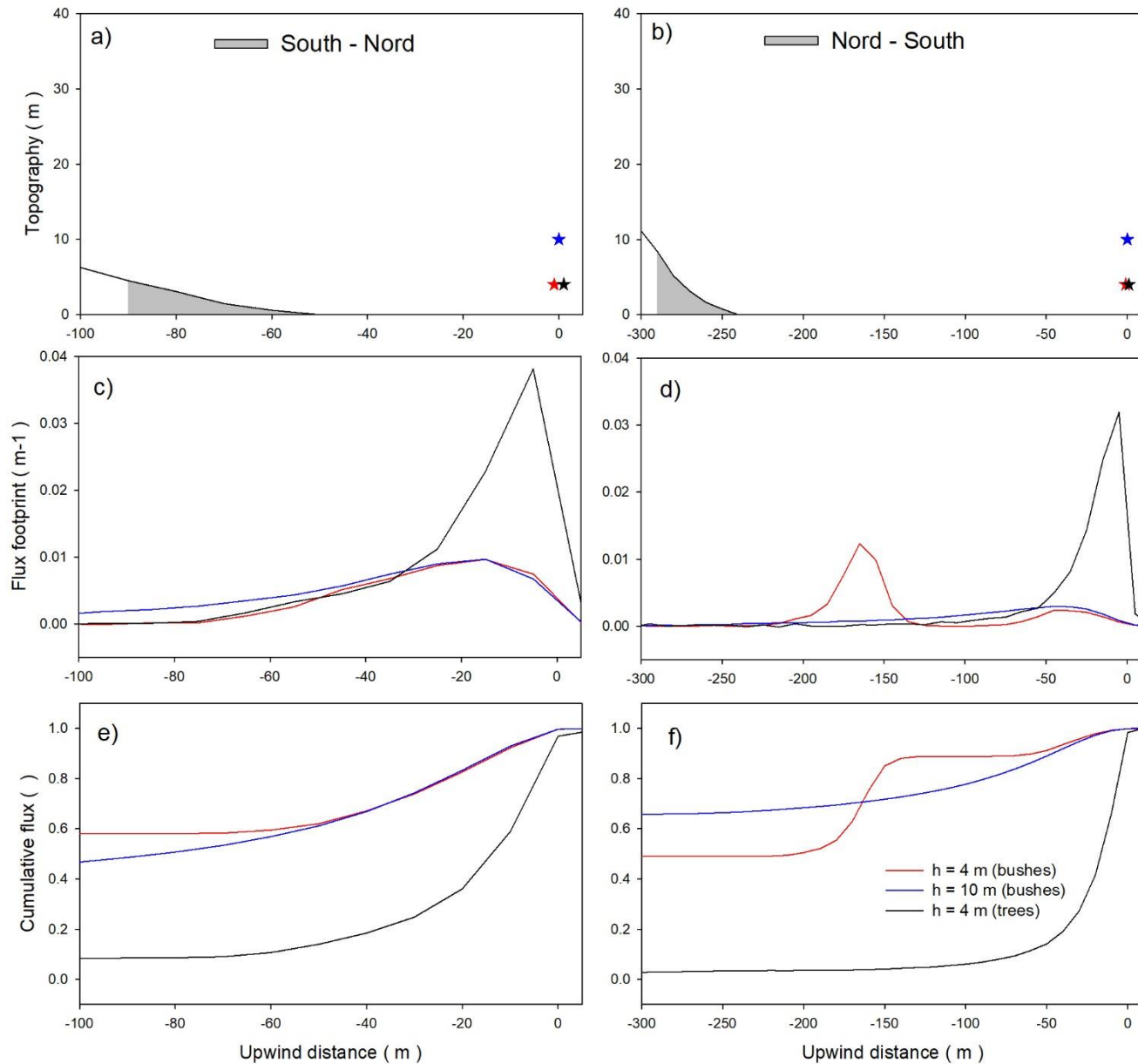
Футпринты и кумулятивные потоки для сенсоров на разных высотах 4 и 10 м (звездочки) для южного и северного направлений ветра.

Результаты: (N – S), (РП: h = 3 м, LAI = 0.5)



Футпринты для северного и южного направления ветра для датчиков на разных высотах 4 и 10 м (звездочки) при растительности на островах представленной кустарником. Футпринт для сенсора на 4 м (черная звездочка) в случае древесной растительности показан для сравнения.

Результаты: (N – S), (РП: $h = 3$ м, LAI = 0.5) (zoom)



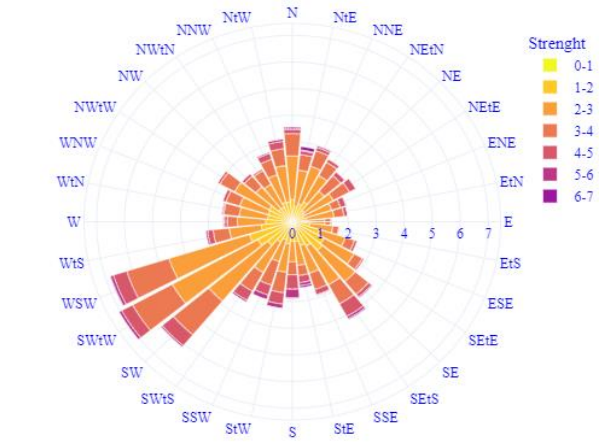
Футпринты для северного и южного направления ветра для датчиков на разных высотах 4 и 10 м (звездочки) при растительности на островах представленной кустарником. Футпринт для сенсора на 4 м (черная звездочка) в случае древесной растительности показан для сравнения.

Основные выводы

- Проведена предварительная оценка области воздействия на газообмен водоем-атмосфера в прибрежной зоне:

Таблица 1. Процент информации достигающий датчика с наветренной водной поверхности до ближайшей береговой линии (примерно)

Тип растительности	Высота датчика	Северный	Восточный	Южный	Западный
Древесный	4 м	95%	70%	90%	90%
	10 м	90%	30%	70%	60%
Кустарниковый	4 м	50%		40%	
	10 м	35%		40%	



Западное направление ветра предпочтительно для анализа ЕС данных!

- Эксперименты по трансекте север-юг показали значительную зависимость области охвата датчика от используемой информации о поверхности. Присутствие высокой растительности в прибрежной наветренной зоне усиливает вертикальный обмен над водной поверхностью.
- Точное прогнозирование футпринта требует детализации как топографии, так и растительности.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 24-17-00155 и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FFER-2022-0002 (тема № 1022031600002-1-1.6.19), а также за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Дополнение

- Аналитические модели

- Применимы только к параметризации приземного слоя атмосферы

- Лагранжевы стохастические модели

- Требуют predetermined поле турбулентности
- Могут применяться к атмосферному пограничному слою (ABL) + растительному покрову + неоднородному потоку + сложному рельефу

- Модели на основе метода замыкания (RANS)

- Возможность моделирования поля турбулентности
- Применимо к растительному покрову + неоднородному потоку + сложному рельефу
- Могут сочетаться с моделью LS
- Требование к вычислительным ресурсам

- Модели основанные на методе больших вихрей (LES)

- Самая продвинутая модель (?)
- Возможность моделирования поля турбулентности
- Применимо к ABL + растительному покрову + неоднородному потоку (+ местности с ограниченной сложностью)
- Могут сочетаться с моделью LS
- Очень высокие требования к вычислительным ресурсам