

Оценка зоны охвата (footprint) турбулентных измерений в условиях сложной орографии арктической тундры (на примере острова Самойловский)

^{1,2,*}Согачев А.Ф., ²Чечин Д.Г., ²Репина И.А.

¹ Географический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова

² ИФА им. А.М. Обухова, РАН

* andreysogachev@gmail.com

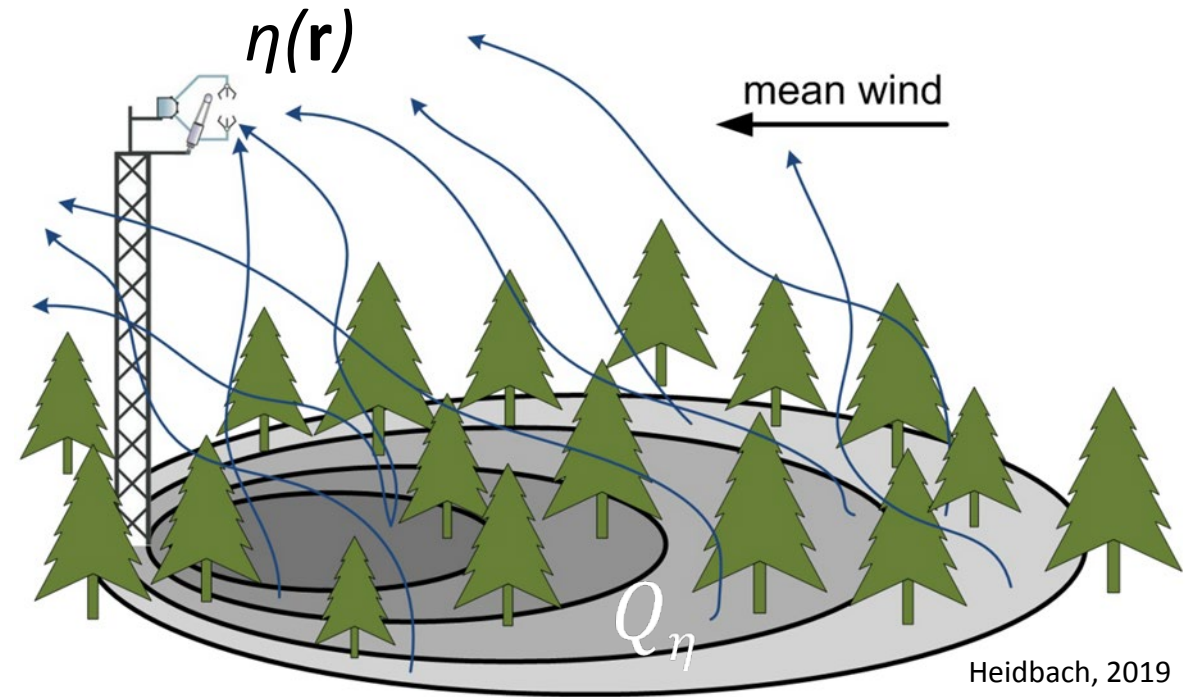
Концепция футпринта (*footprint*)

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

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

Конфигурация и протяженность футпринта зависит от

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



Переменные по времени

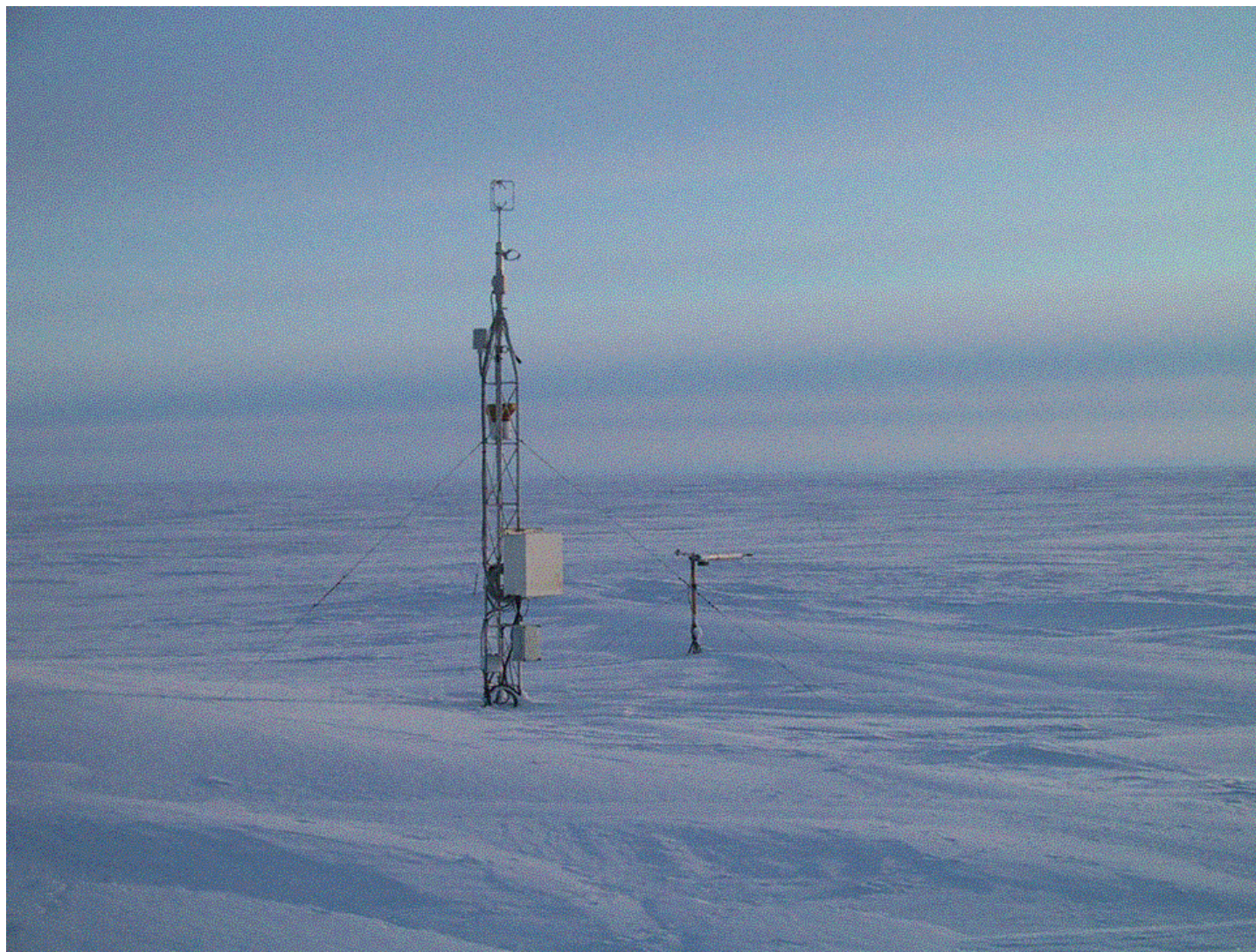
(Wilson and Swaters 1991; see also Pasquill and Smith 1983)

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)

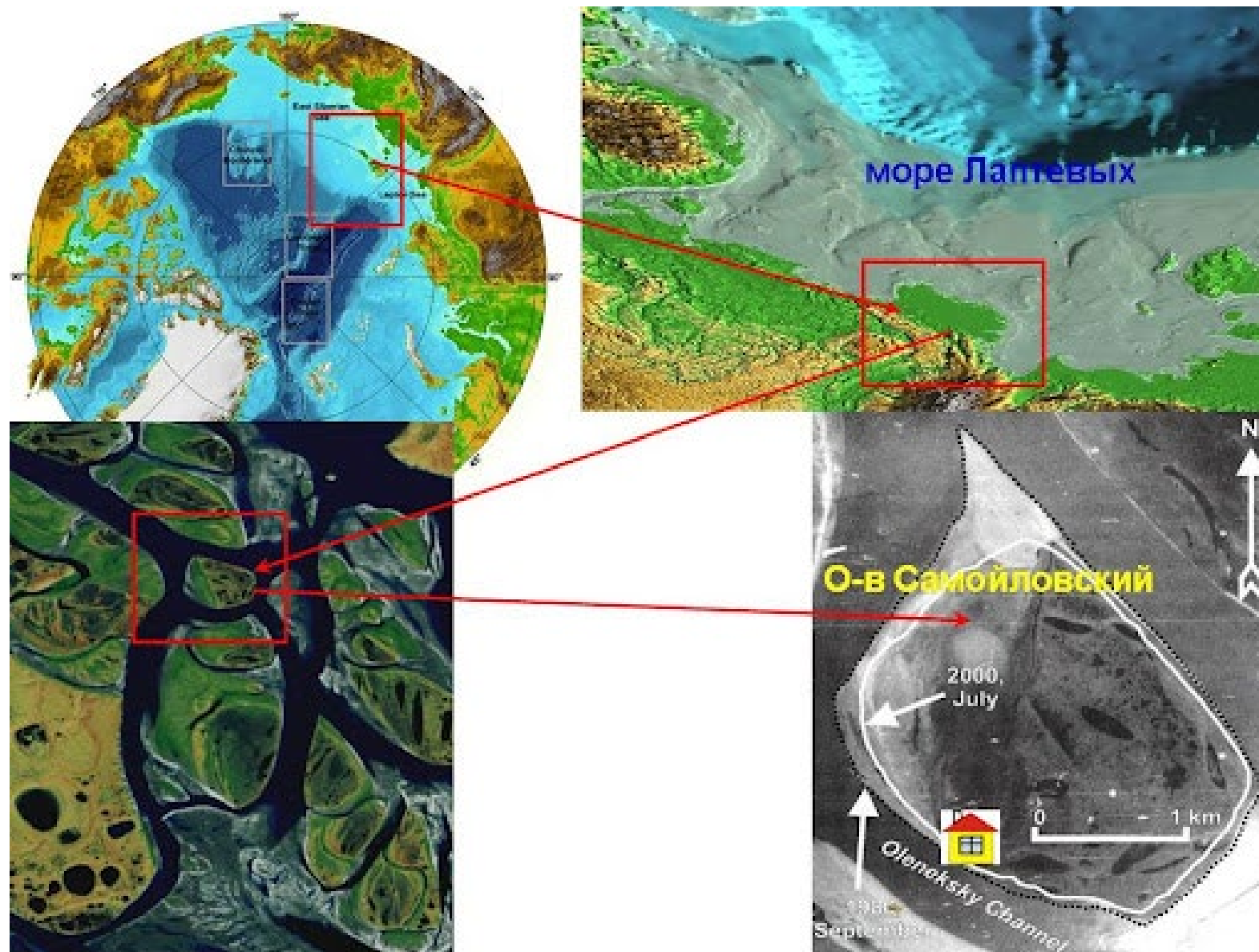
Когда футпринт не нужен...



...и нужен. Арктическая тундра

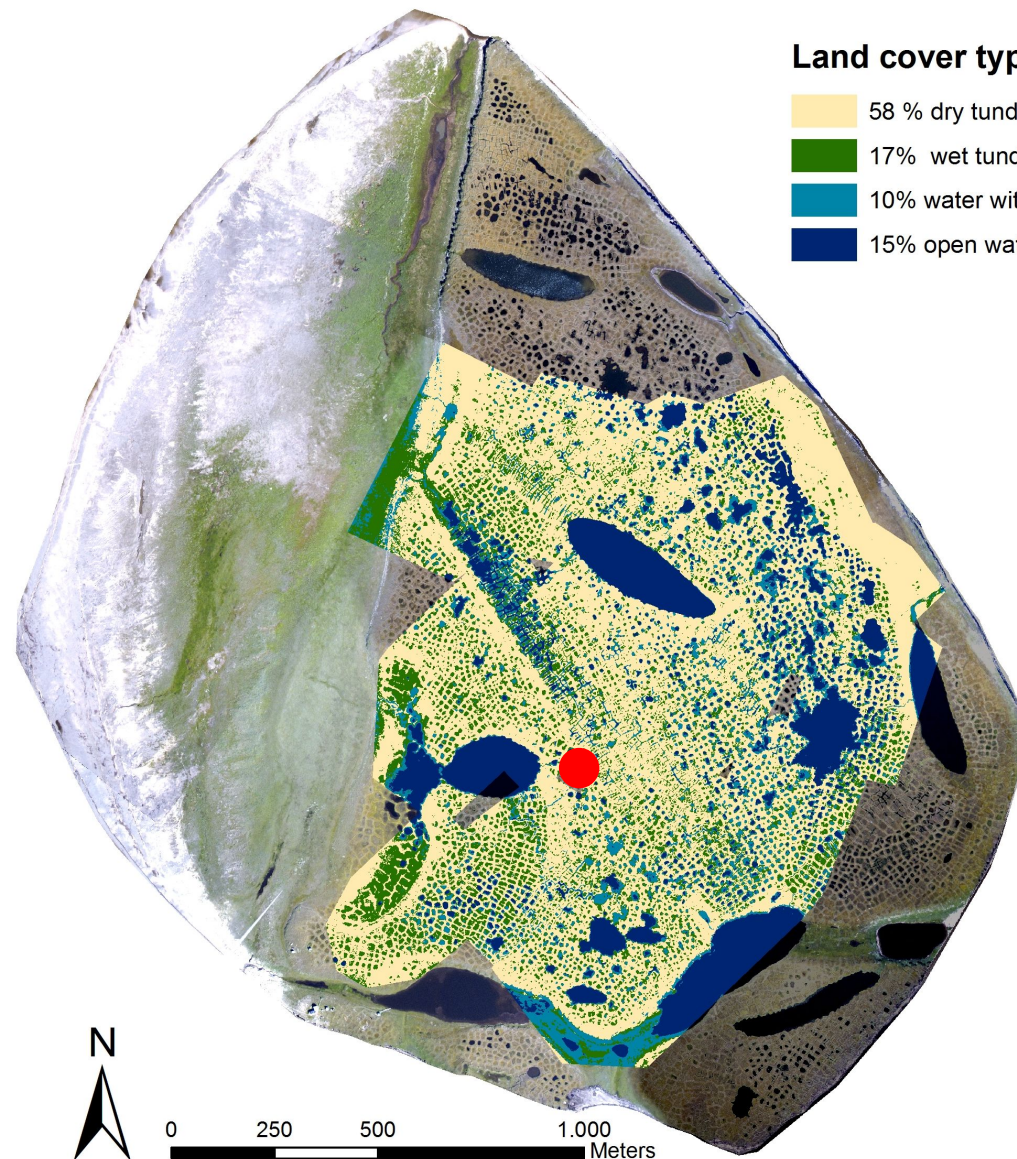


Остров Самойловский: научный полигон



72°22'38"N 126°29'17"E

Экосистема и окружение острова



Оценка зоны охвата (*footprint*) станции

Аналитический подход

Модель КМ (Kormann and Meixner, 2001) основана на аналитическом решении уравнения адвекции-диффузии (van Ulden, 1978; Horst, 1979).

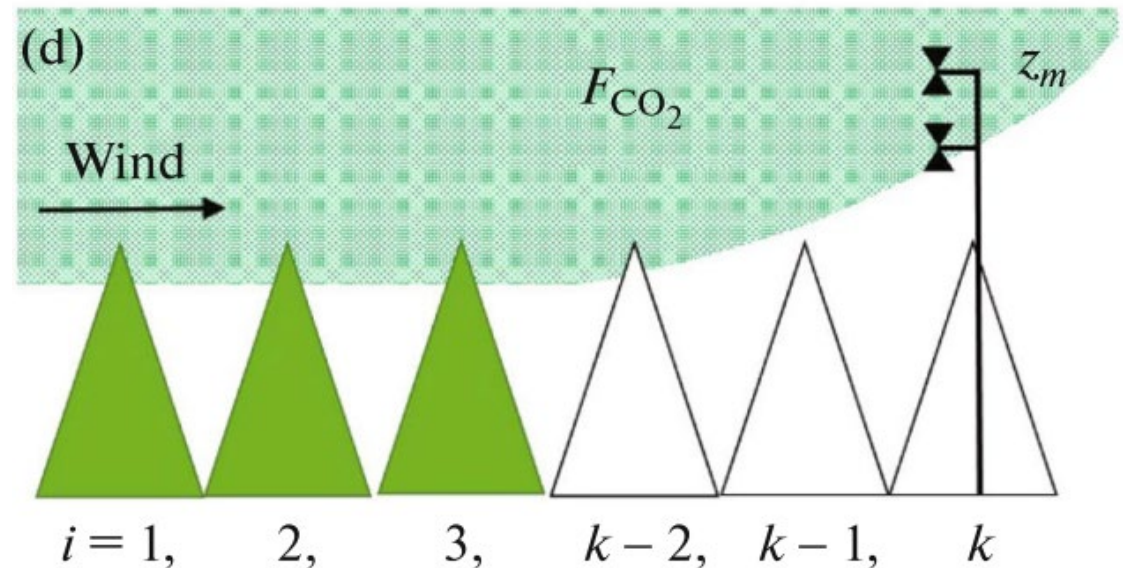
$$\overline{f^y}(x) = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{\xi^\mu}{x^{1+\mu}} \exp\left(-\frac{\xi}{x}\right)$$

где Γ – это гамма функция, ξ – масштаб перемешивания, зависящий от профиля скорости ветра и коэффициента турбулентного обмена, μ – эмпирическая константа.

$$f(x, y) = D_y(x, y) \overline{f^y}(x)$$

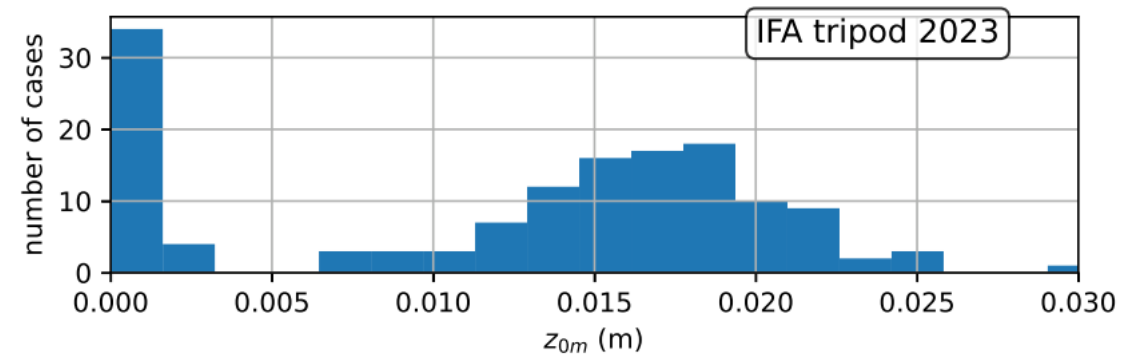
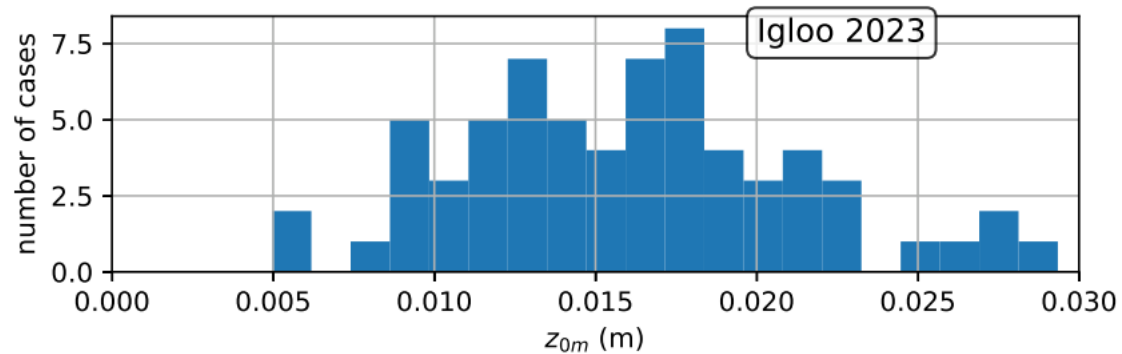
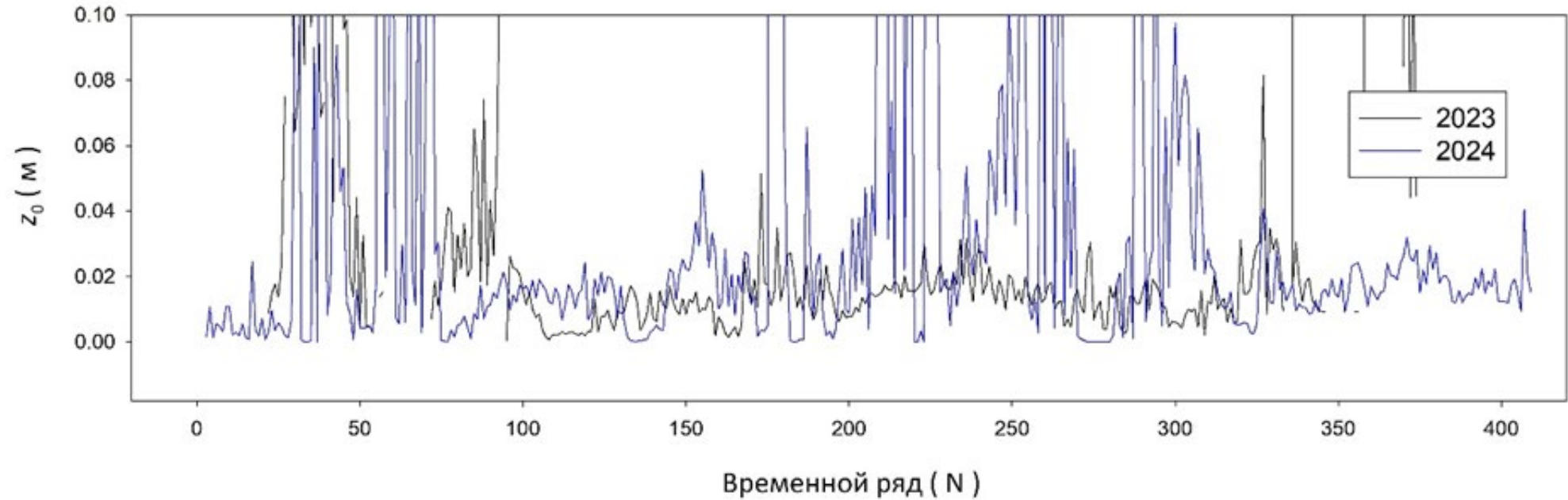
Подход вычислительной гидродинамики

Sogachev and Lloyd (2004) метод основан на RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) модели пограничного слоя атмосферы SCADIS.

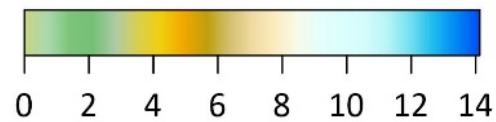
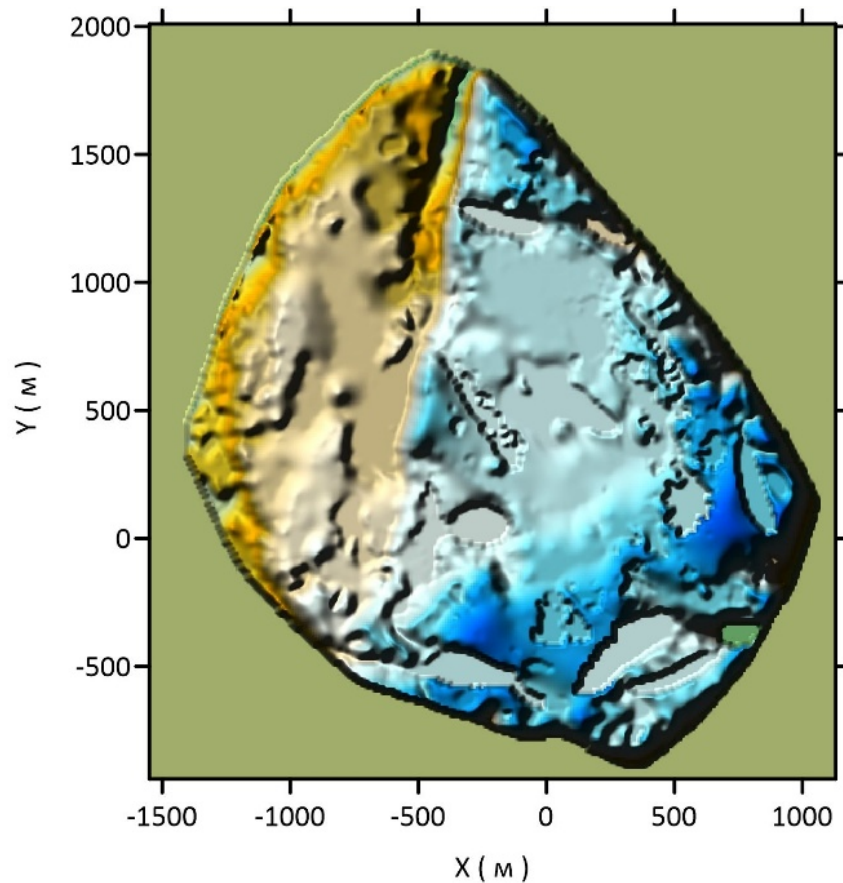


После нормализации суперпозиции вертикальных полей потока, генерируемых последовательно активируемыми источниками, оценивается вклад каждой ячейки в поток в интересующей точке.

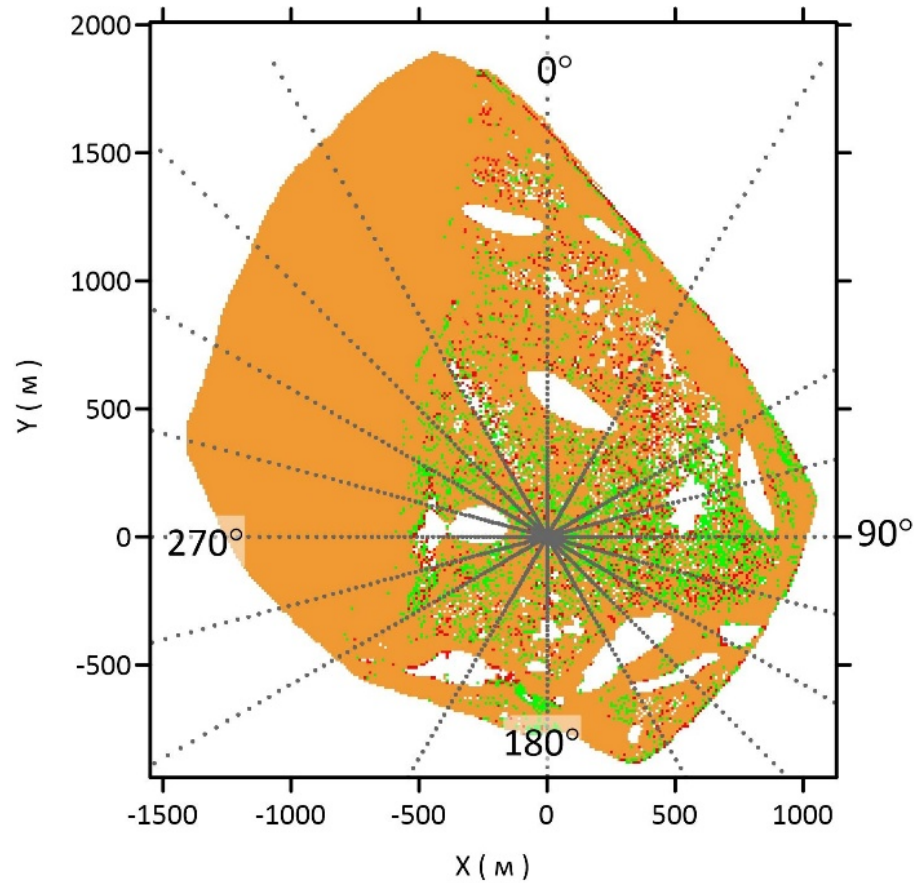
Наблюдения: оценка шероховатости ($H = 4$ м)



Орография и типы поверхности острова в модели



Орография (м)

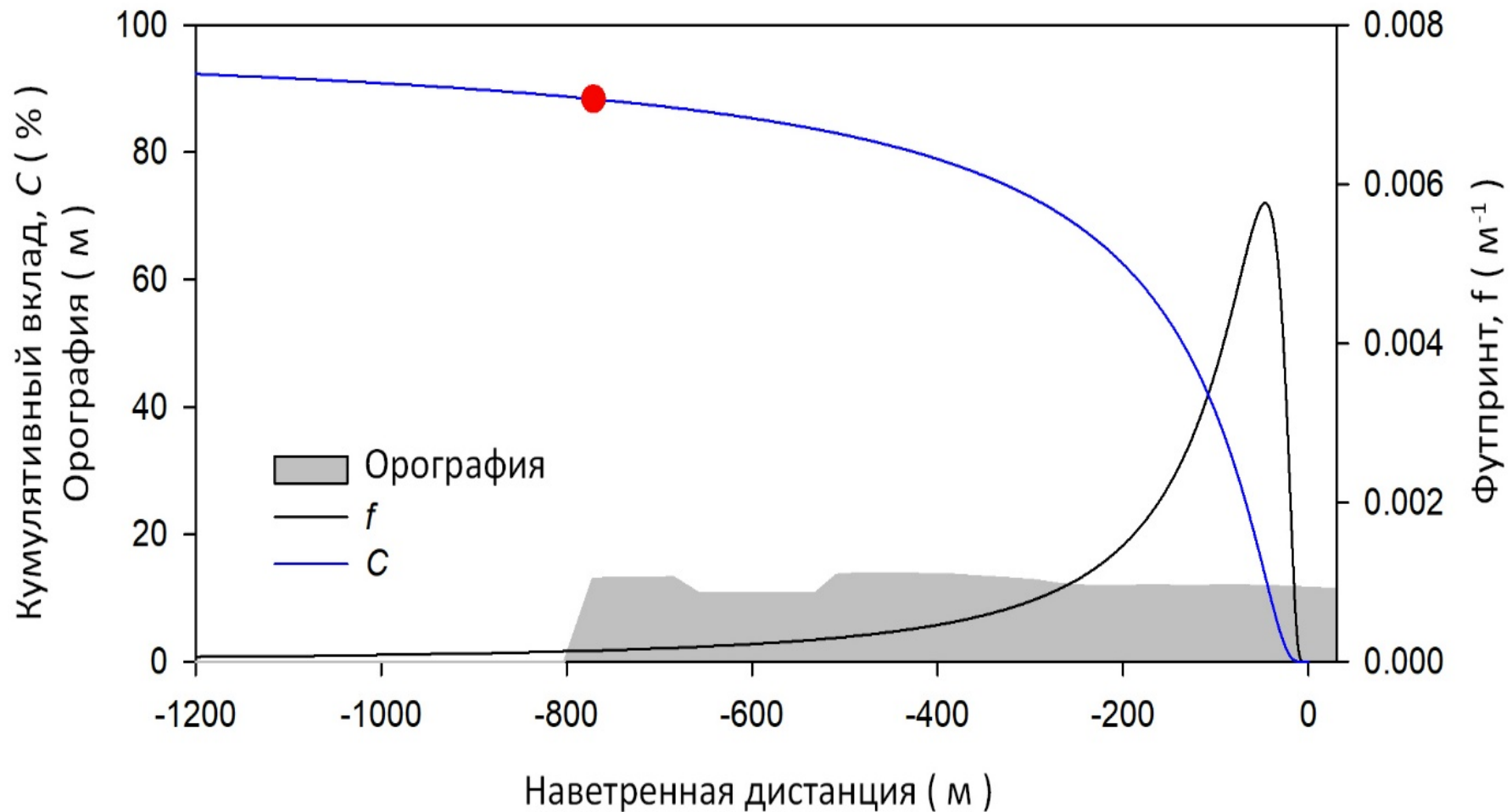


Типы поверхности

- $z_0 = 0.01$ м, (Тип 1)
- $z_0 = 0.02$ м, (Тип 2)
- $z_0 = 0.002$ м, (Тип 3)
- $z_0 = 0.0002$ м, (Тип 4)

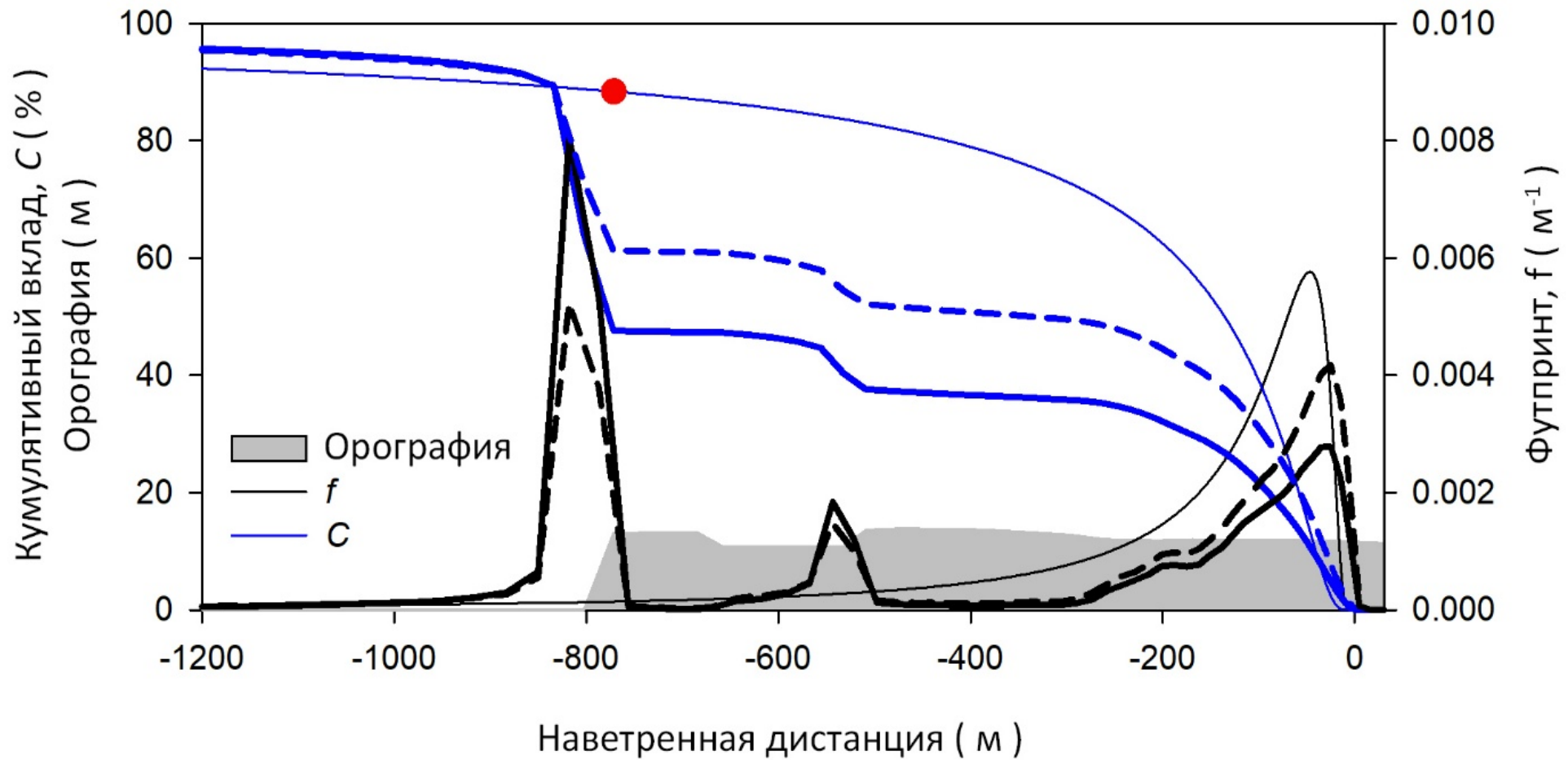
Орография (слева) и типы поверхности острова Самойловский (справа) используемые при моделировании (см. текст). Точечные линии в правой панели показывают направления, вдоль которых производилась оценка футпринта.

Аналитическая (КМ) оценка ($H = 4$ м)



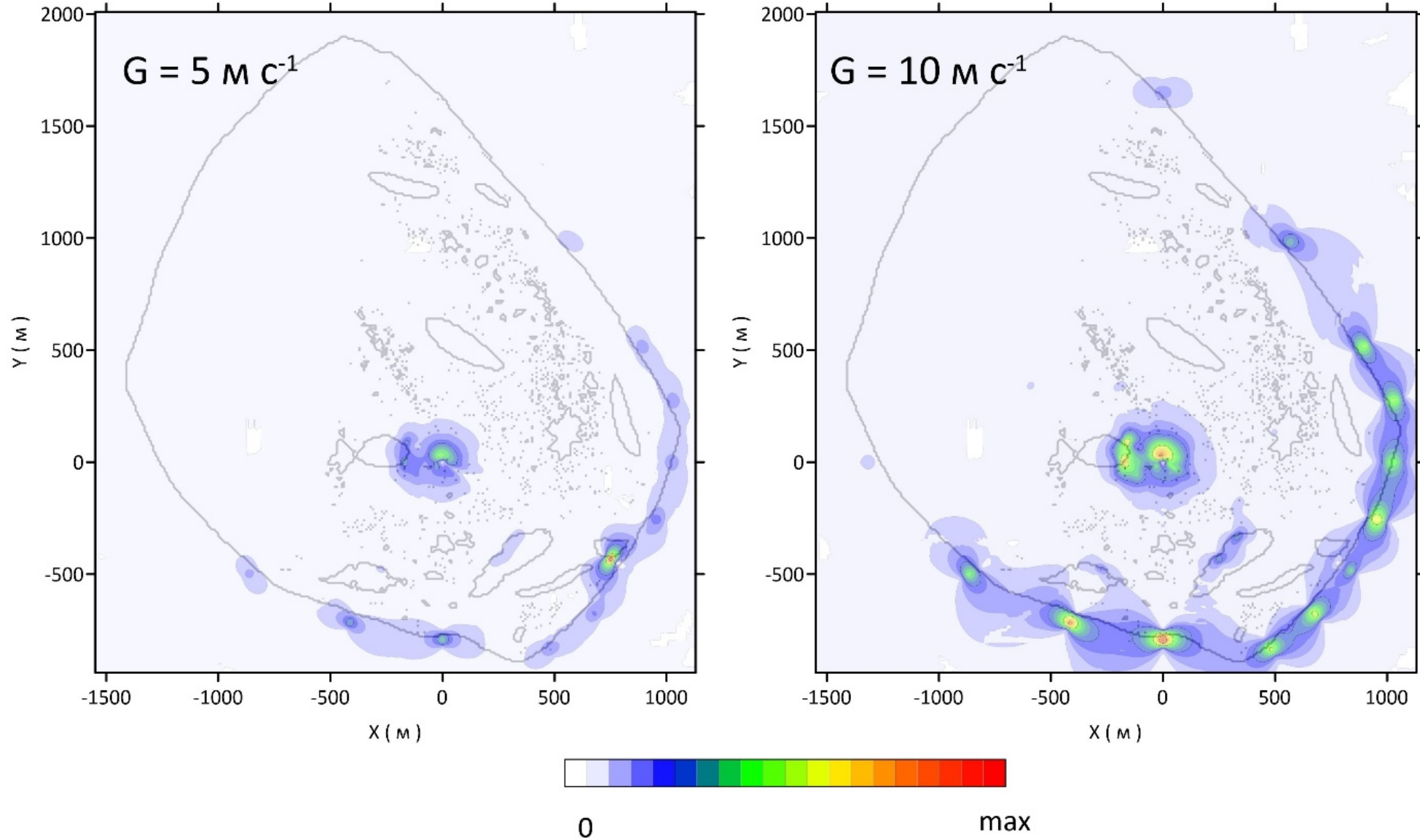
Футпринт и соответствующий ему кумулятивный вклад для сенсора на высоте 4 м, полученный аналитическим методом (Kormann and Meixner, 2001) над поверхностью с шероховатостью $z_0 = 0.02$ м. Орография дана вдоль трансекты 210°. Красная точка указывает вклад в измерения от края острова.

KM vs SCADIS ($H = 4$ м)

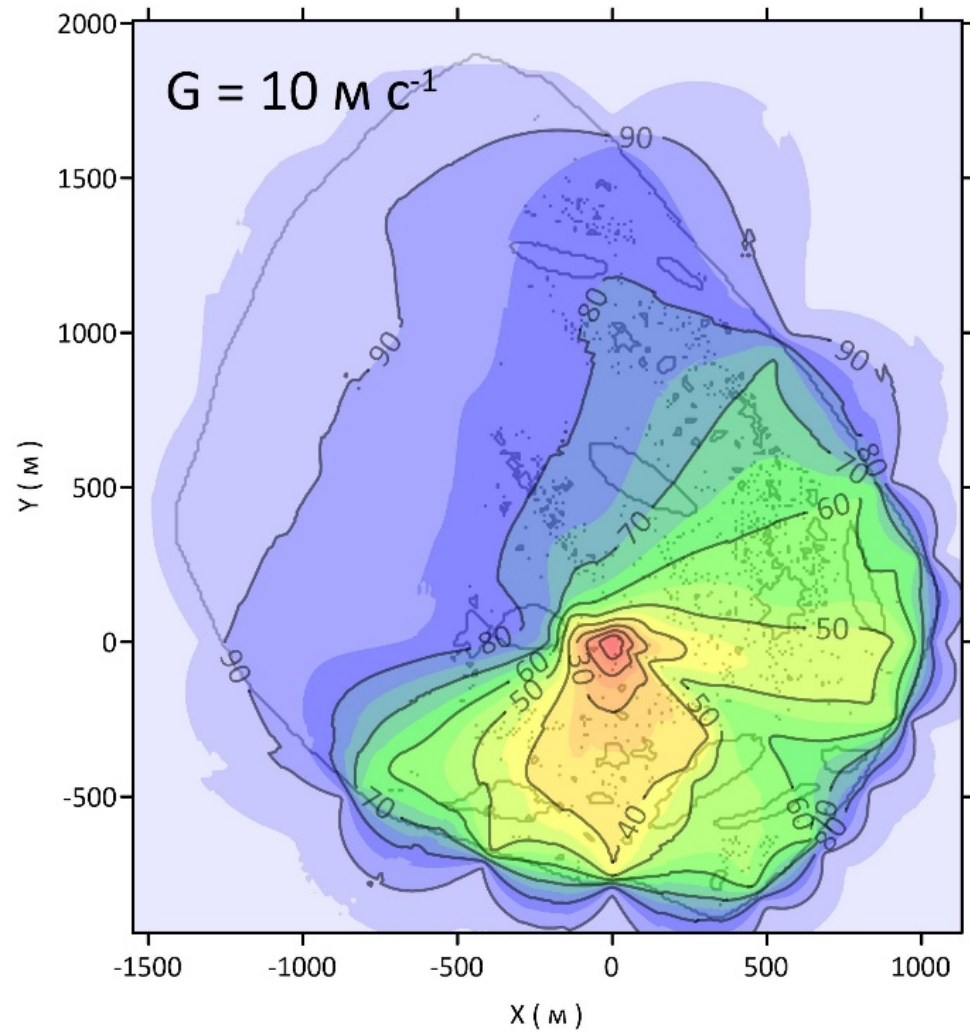
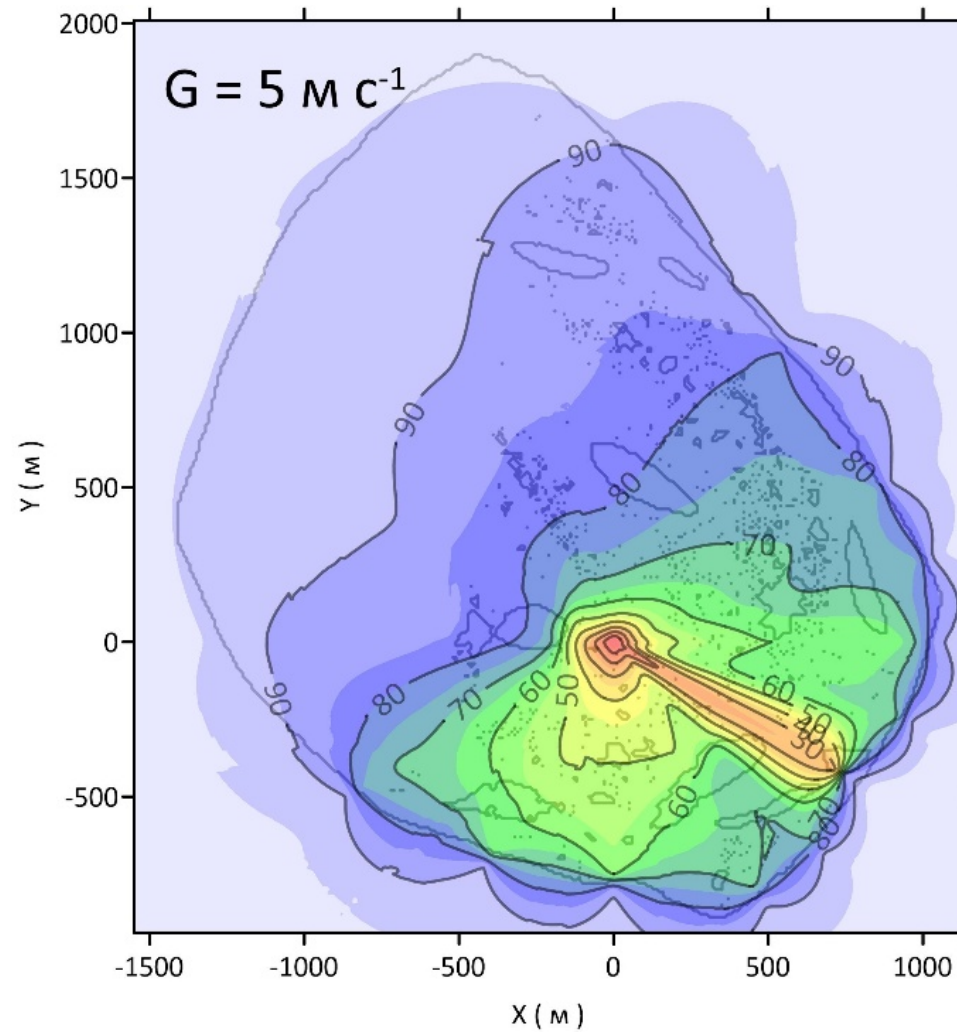


Сравнение аналитического (тонкая линия) и получаемого с использованием SCADIS функций футпринта (жирная линия) и соответствующих функций кумулятивного вклада при направлении набегающего потока 210° . Оценка с использованием SCADIS сделана для двух скоростей геострофического ветра 5 м с^{-1} (пунктирная линия) и 10 м с^{-1} (сплошная линия).

Области влияния в измерения (H = 4 м)



Кумулятивный вклад (%) в измерения ($H = 4$ м)



Ключевые выводы

- Зона охвата для данной станции сильно зависит от сложной топографии (наветренные побережья с большой крутизной и близлежащие озера с обрывистыми краями).
- Топография острова генерирует не только вертикальные движения воздуха, но и зоны повышенной турбулентности, влияя на перенос пассивной субстанции с поверхности.
- Аналитические модели переоценивают вклад острова: наши результаты показывают, что только 70 % сигнала формируется поверхностью самого острова при воздушном течении с обрывистого края острова.
- Результаты носят предварительный характер. Рекомендуется провести моделирование воздушного потока более высокого разрешения, лагранжево моделирование обратного хода, а также учитывать устойчивость атмосферы.