Проблемы оценки риска заморозка по данным радиометра MODIS.

С.Г.Крицук, И.Ш.Латыпов, В.И.Горный

Санкт-Петербург, ФИЦ РАН

Ключевое понятие: ЗАМОРОЗОК – краткое снижение температуры ниже определённой отметки.
С точки зрения физиологии растений - это снижение температуры растения ниже определённой отметки на короткий, фиксированный интервал времени, приводящее с некоторой вероятностью к гибели растения. То есть с практической точки зрения важно картировать временные границы безморозного периода, когда вероятность заморозка, характеризуемого пограничными температурой и продолжительностью, ниже заданной.

Цель исследования: картирование риска заморозка на основе минимальной суточной температуры подстилающей поверхности по данным тепловой съёмки спутниками EOS (радиометра MODIS).

Особенности данных MODIS в тепловом диапазоне (продукты MOD11A1 и MYD11A1):

- высокие ошибки восстановления температуры
- вариации времени «ночных» съёмок для Terra в интервале 21:30 – 0:30 МСК

и Aqua в интервале 2:00 – 4:30 МСК

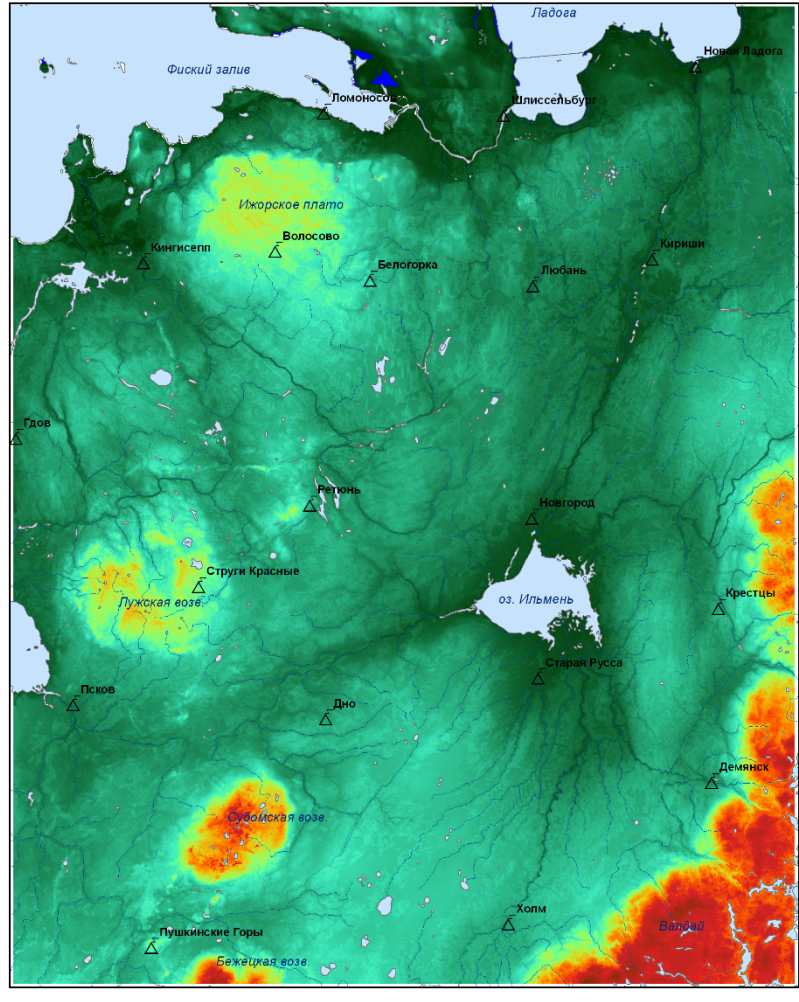
Определяют необходимость расчета на первом этапе расчёта предрассветной температуры поверхности и, вероятно, исключения аномально низких спутниковых температур,

Картирование статистических характеристик заморозков на завершающем этапе из-за большого количества пропусков во временных рядах требует привлечения дополнительных данных метеонаблюдений и реанализа о минимальных температурах.

«Испытательный полигон» : Запад Ленинградской и Новгородской областей.

При подготовке были использованы:

- данные двадцати четырёх метеостанций за 2010-2024 гг. <rp5.ru>, <meteo.ru>
- данные MODIS (MOD11A1 MYD11A1) за 2010-2024 гг. <ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>
- цифровая модель рельефа Copernicus_DSM_COG_30_DEM < copernicus-dem-30m.s3.amazonaws.com>
- данные реанализа ERA5 <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land>
- карта растительности < copernicus-dem-30m.s3.amazonaws.com>
- карта растительного покрова России *С.А.Барталев, В.А.Егоров, Д.В.Ершов, А.С.Исаев, Е.А.Лупян, Д.Плотников, И.А.Уваров* Спутниковое картирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS. //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 2011

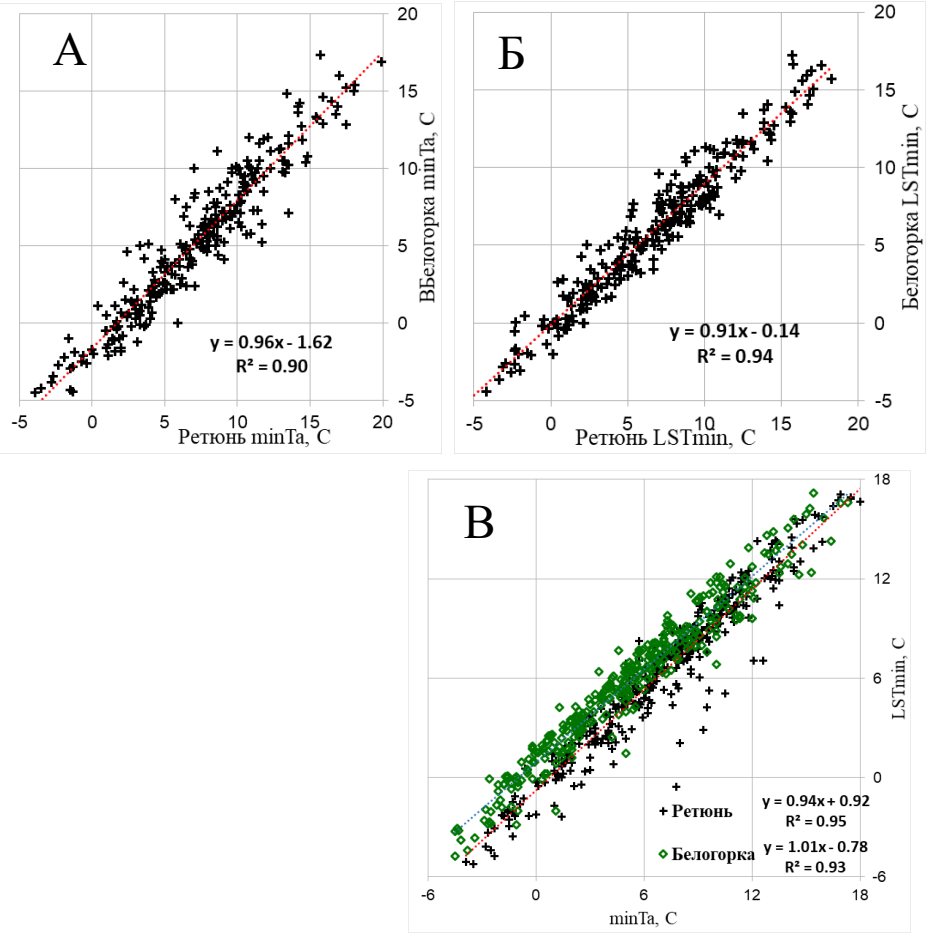


На предыдущем этапе* на основе анализа спутниковых данных совместно с данными метеостанций и метеобашен были сделаны следующие выводы:

- Расчёт предрассветной температуры поверхности, выполненный на основе квадратичного сплайна температуры по времени с использованием двух спутниковых измерений и времени восхода Солнца (точки минимума), позволяет отказаться от учета времени съёмки и долготы местности при картировании статистик заморозков.
- Риск заморозка, оцененный по параметрам распределения предрассветной температуры поверхности, позволяет снизить влияние высоких погрешностей оценки температур поверхности и вероятности как пропуска заморозка, так и «ложного» заморозка.
- Исключение экстремально низких предрассветных температур поверхности, если судить по данным в точках расположения метеостанций, сближает оценки риска по метеорологическим и спутниковым данным при этом последние снижаются ~20%.
- Предрассветная температура поверхности в точках расположения метеостанций коррелирует с минимальной температурой воздуха. Анализ их совместного распределения представляет возможность исключения аномальных значений.
- Пространственное разрешения данных метеостанций меньше пространственного разрешения данных MODIS.

*С.Г.Крицук, И.Ш.Латыпов, В.И.Горный Опыт оценки минимальной суточной температуры поверхности по данным радиометра MODIS. Двадцать третья международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 10-14 ноября 2025, Москва, ИКИ РАН

Совместные распределения минимальной температуры воздуха (minTa) и предрассветной температуры поверхности – LSTmin в дни съёмки на двух метеостанциях на ЮЗ Ленинградской области

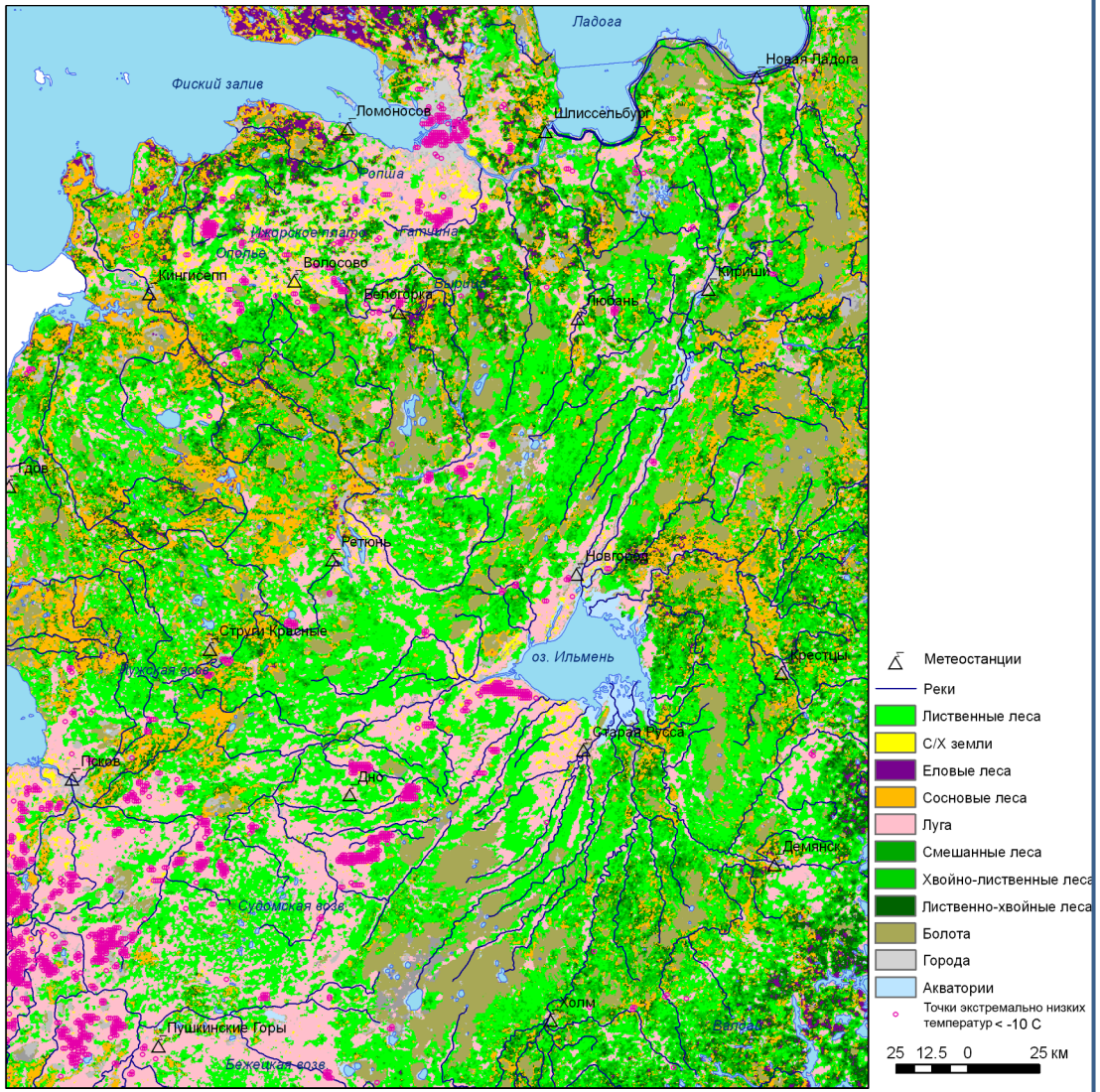


Снижение вероятности ошибок оценки характеристик заморозков на первом этапе возможно при использовании:

- Анализа пространственного распределения температуры поверхности в пределах одной сцены и отбраковка аномально низких температур (ниже процентили в первые проценты, считая распределение нормальным)
- Отбраковка температур поверхности по спутниковым данным ниже фиксированного предела (для мая-июня ниже -20С)
- Отбраковка сцен с малым процентом (<10-20%) покрытия данными – большой долей пикселов с флагом нет данных.
- Расчёта предрассветной температуры поверхности.
- Анализа в каждом пикселе совместного распределения предрассветной температуры поверхности по данным MODIS и минимальной температуры (на основе интерполяции данных измерений на метеостанциях или данных реанализа ERA5) и отбраковка аномально низких температур (ниже процентили в первые проценты, считая распределение нормальным по обеим температурам)

Экстремально-низкие температуры поверхности

(MODIS - продукты MOD11 MYD11) за май – июнь 2010 – 2024 гг.

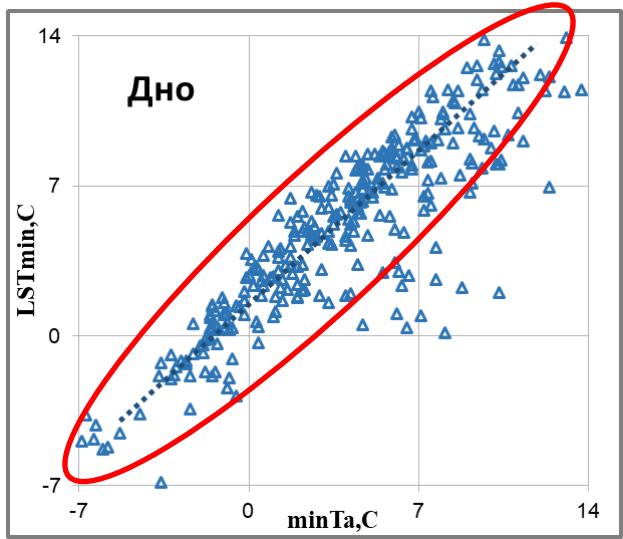


Экстремально низкие спутниковые температуры поверхности привязаны к области активной деятельности человека, в частности, к землям сельско-хозяйственного назначения и могут быть связаны с особенностями их эксплуатации и/или гидрологического режима.

Если признать эти значения ошибочными, то их фильтрация может быть выполнена на основе отбраковки аномальных значений исходя из анализа

- пространственого распределения температур для каждой сцены спутниковых данных.
- временных рядов - совместного распределения предрассветной температуры поверхности и минимальной температуры воздуха.

На метеостанции Дно температуры за пределами эллипса могут быть исключены



Возможности картирования “заморозковых” харатеристик - риска заморозка и/или даты первого/последнего заморозка в сезоне

1. по спутниковым данным в предположении что ВСЕ заморозки зафиксированы спутниковой съемкой.

$$Риск(T<0) = R(srT<0) \cdot P(clear\ night)$$

2. на основе связи “заморозковых” харатеристик по наземным данным в точках метеостанций со спутниковыми характеристиками поверхности

2а. предрассветная температура поверхности, характеристики рельефа и растительного покрова.	2б. только характеристики рельефа и растительного покрова.	2в. Дневная и «ночная» яркостная температура поверхности по данным Landsat.

3. путем заполнения пробелов в ряду температур поверхности в каждом пикселе регрессионными оценками на основе анализа совместного распределения предрассветной температуры поверхности по данным MODIS и минимальной температуры по данным интерполяции

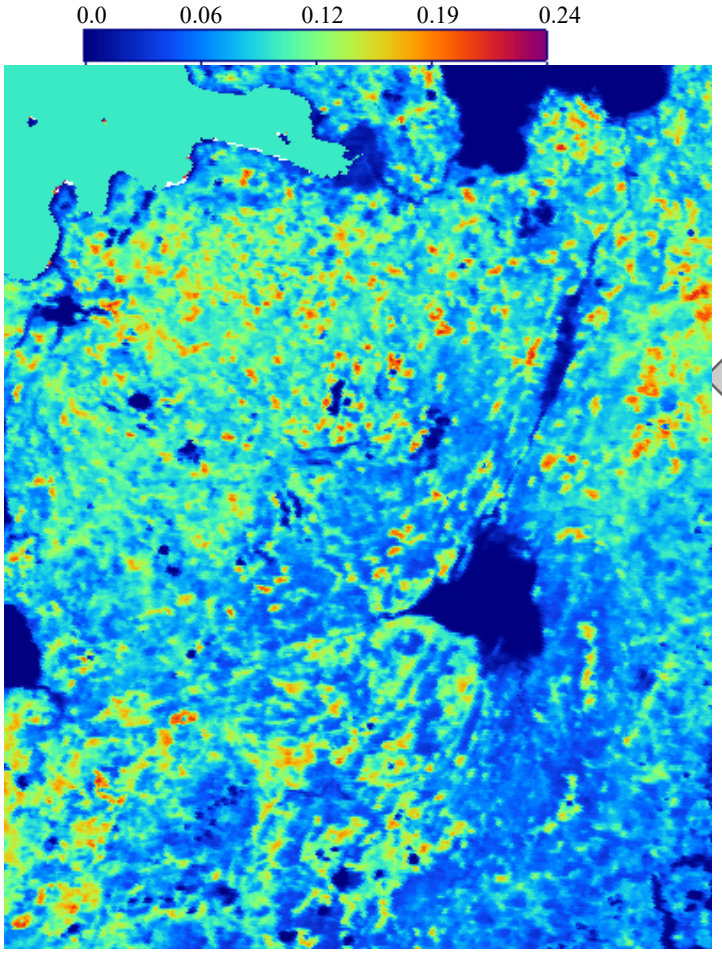
3а. Измерений температуры воздуха на метеостанциях.	Данных реанализа ERA5: 3б. температуры поверхности 3в. температуры воздуха

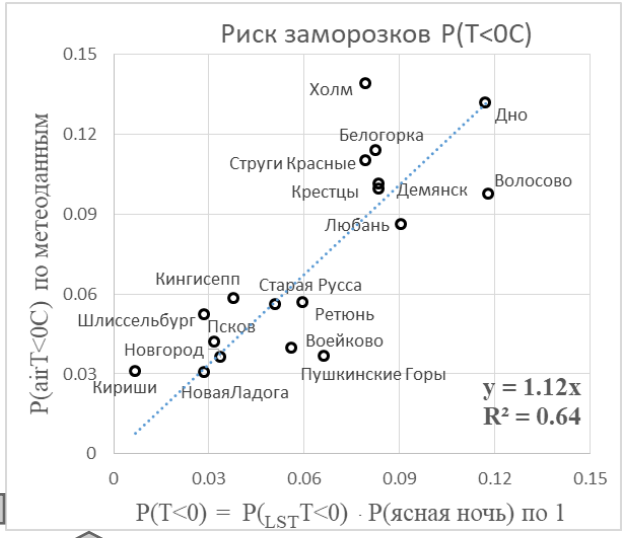
1.Только спутниковые данные о температуре.

Риск заморозка как условная вероятность

(предполагая, что ВСЕ заморозки зафиксированы спутниковой съемкой).

Риск заморозка в мае-июне

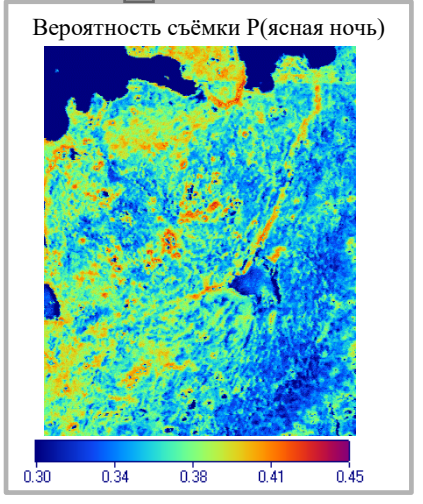




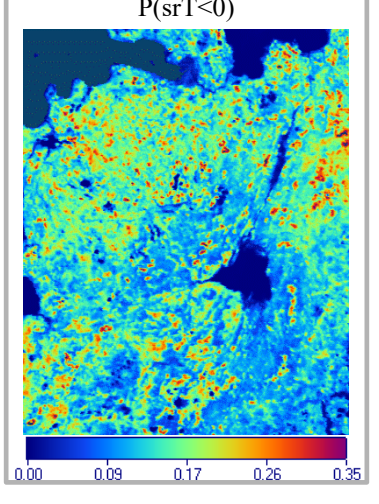
Коррекция по данным метеостанций

Риск(T<0) = P(srT<0) · P(ясная ночь)

Вероятность съёмки P(ясная ночь)



Риск по предрассветной температуре поверхности – P(srT<0)

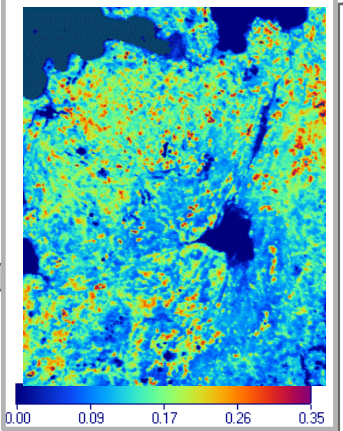


2а. Наземные данные о температуре и спутниковые характеристики поверхности

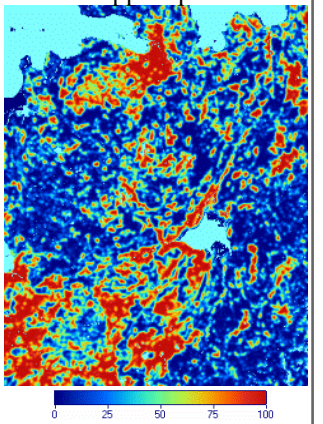
Риски заморозка на 18 метеостанциях

Регрессионная модель в точках расположения метеостанций

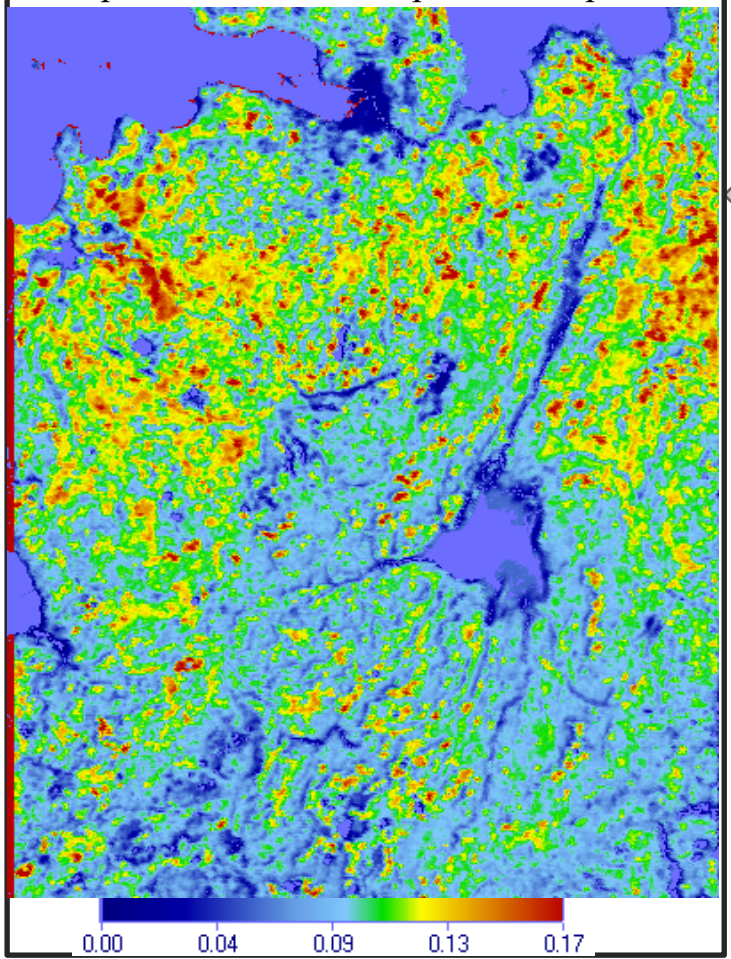
Риск по предрассветной температуре поверхности

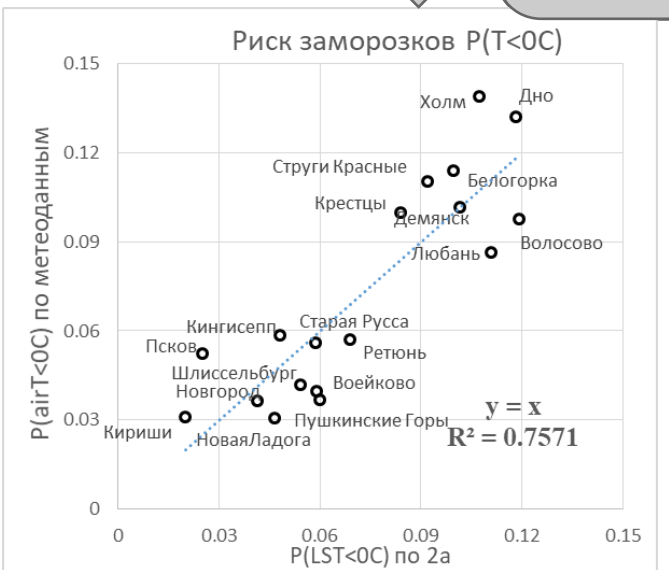


Доля безлесных территорий

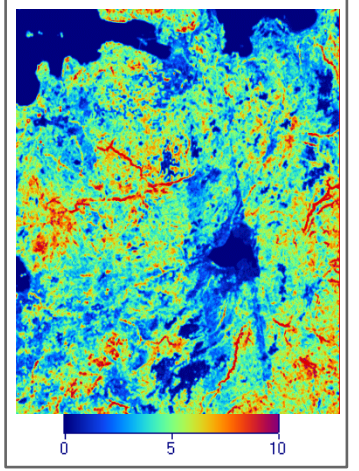


Регрессионная оценка риска заморозка





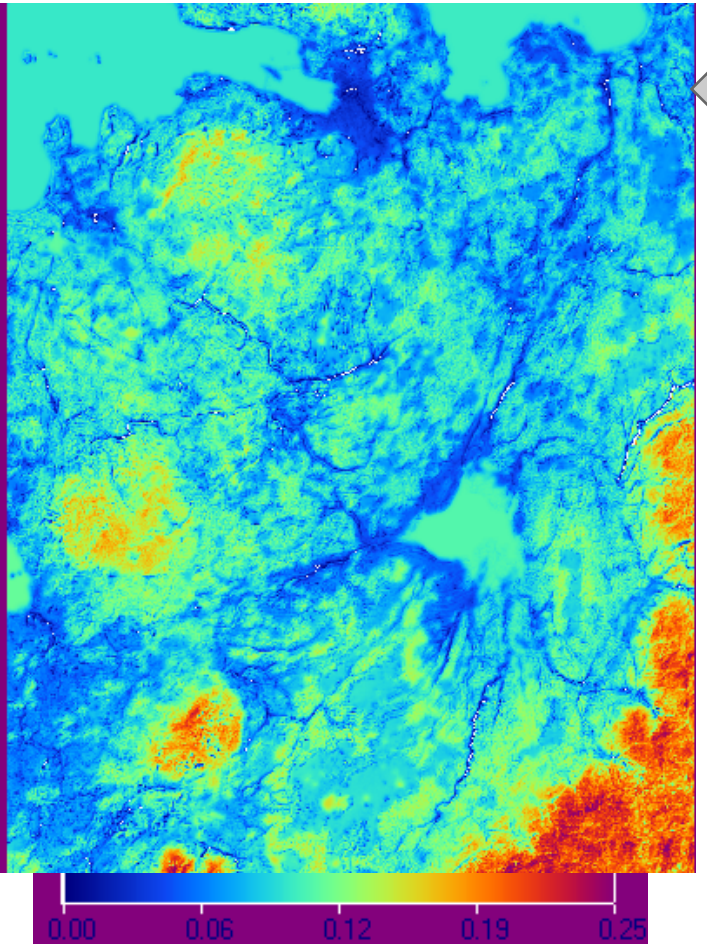
Изрезанность рельефа



2б. Наземные данные о температуре и спутниковые характеристики поверхности

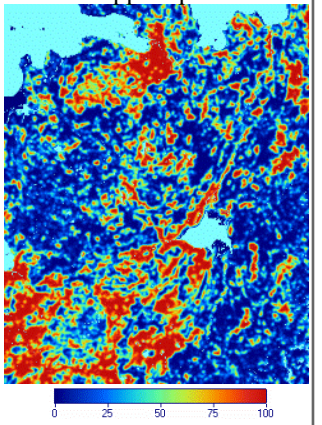
Риски заморозка на 18 метеостанциях

Регрессионная оценка риска заморозка

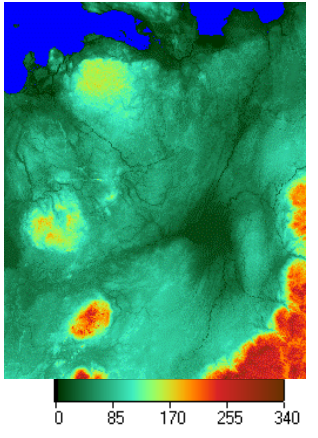


Регрессионная модель в точках расположения метеостанций

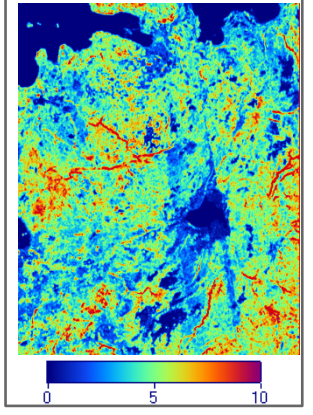
Доля безлесных территорий

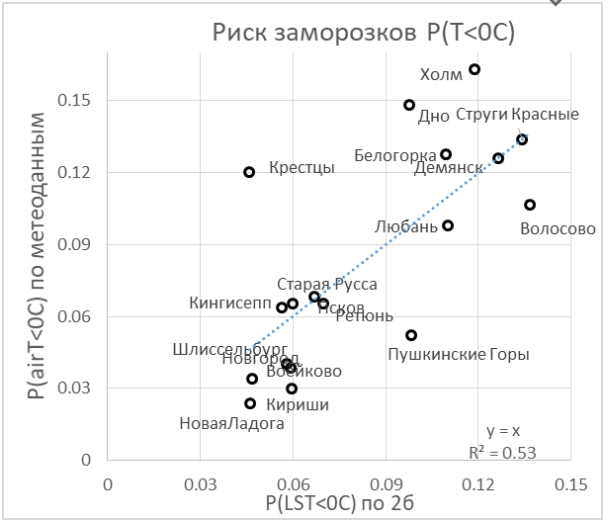


Цифровая модель рельефа



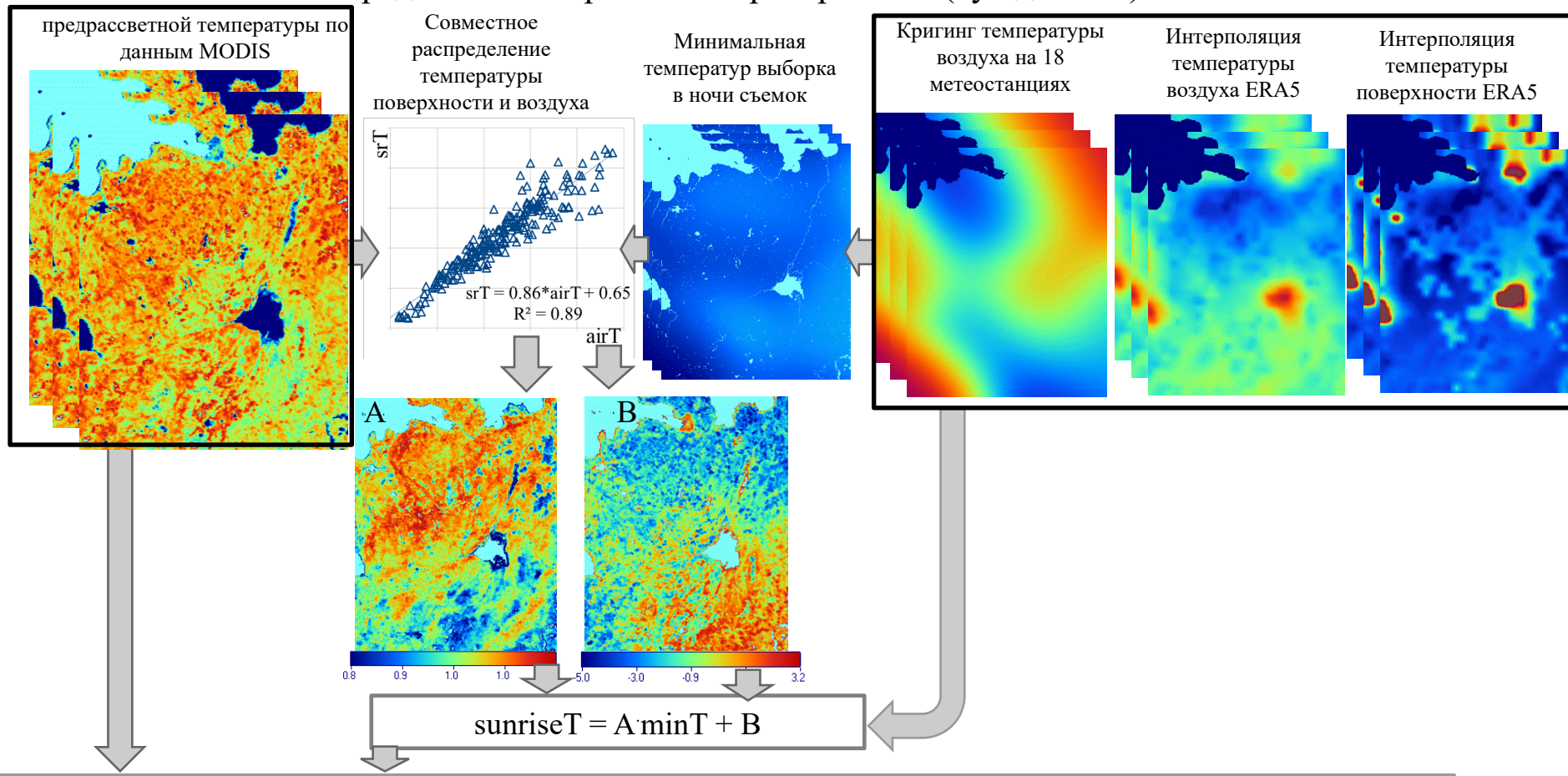
Изрезанность рельефа





3. Заполнение пробелов в рядах предрассветной температуры.

Распределение во времени и пространстве (куб данных)



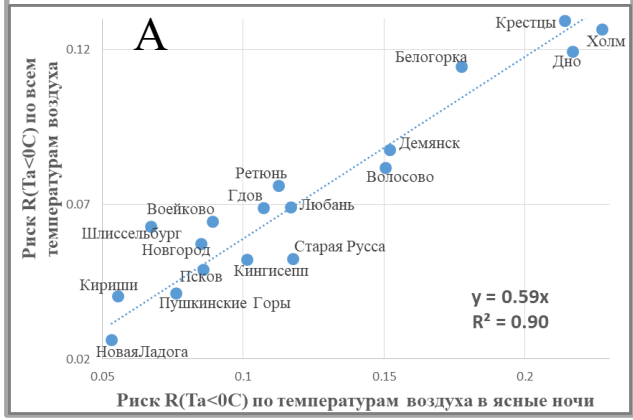
Формирование полного по времени ряда предрассветной температуры, заполнение пропусков в этом ряду с использованием ежедневных минимальных температур воздуха/поверхности.

3. Риски заморозка в мае-июне по полным рядам предрассветной температуры.

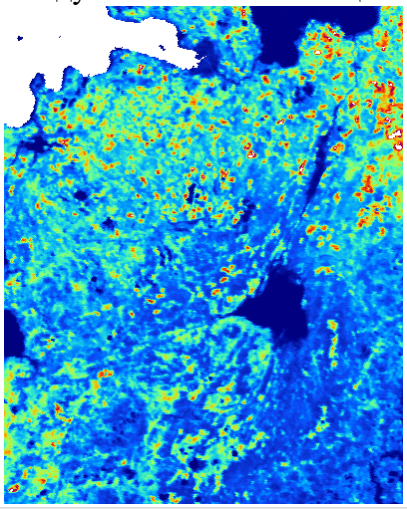
Риск заморозка в ясные ночи в мае-июне

Риск заморозка в мае-июне

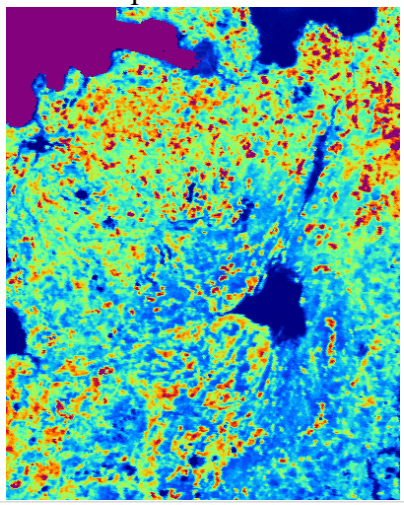
Зависимость риска заморозка от риска заморозка в ночи съёмок для 18 метеостанций



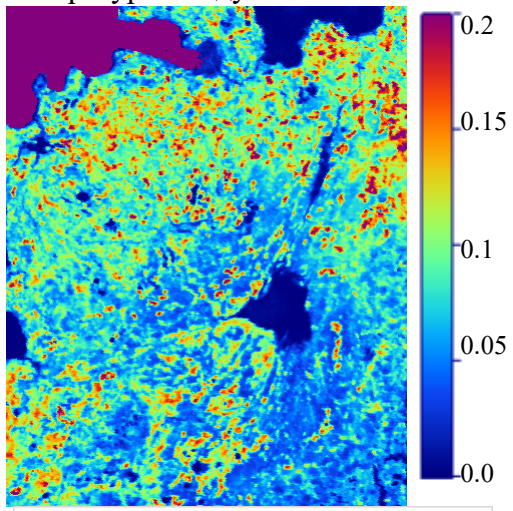
3а. Кригинг температуры воздуха на 18 метеостанциях

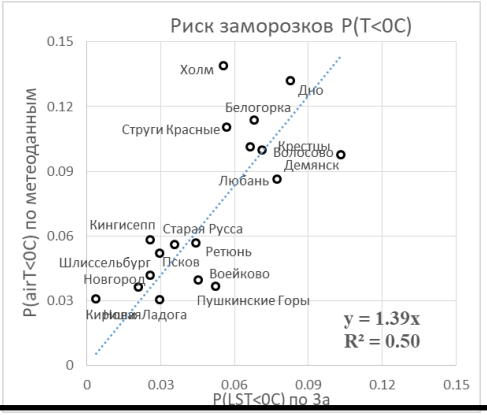


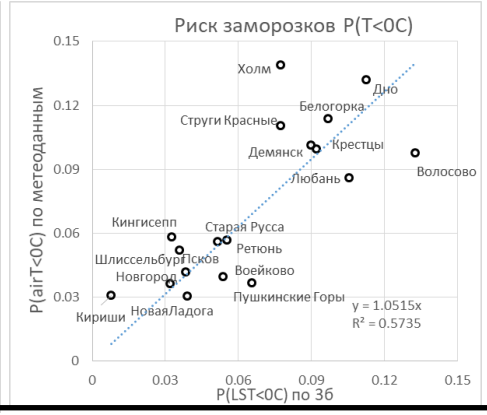
3б. Интерполяция температуры поверхности ERA5

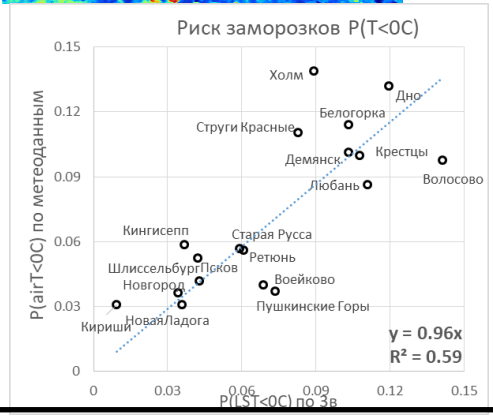


3в. Интерполяция температуры воздуха ERA5







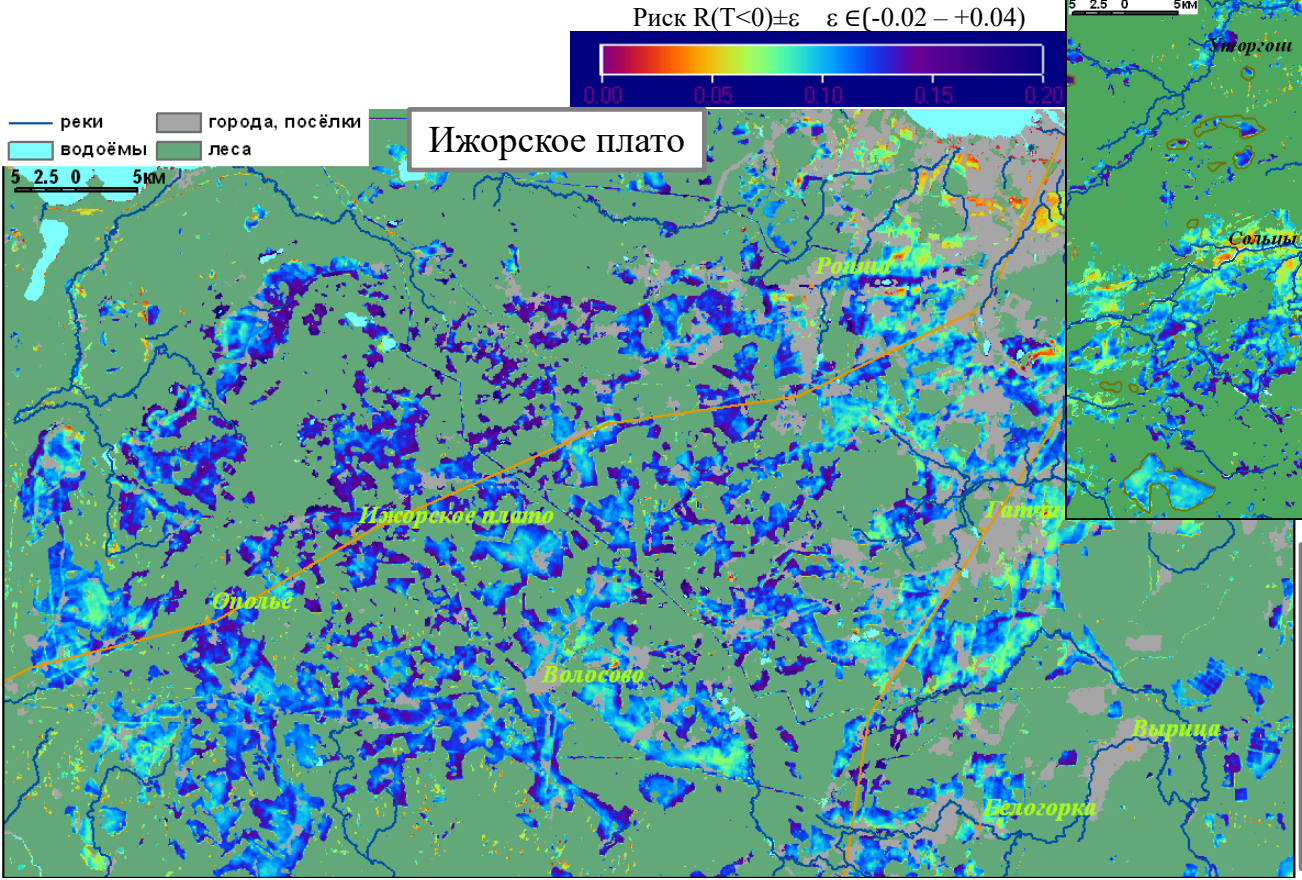


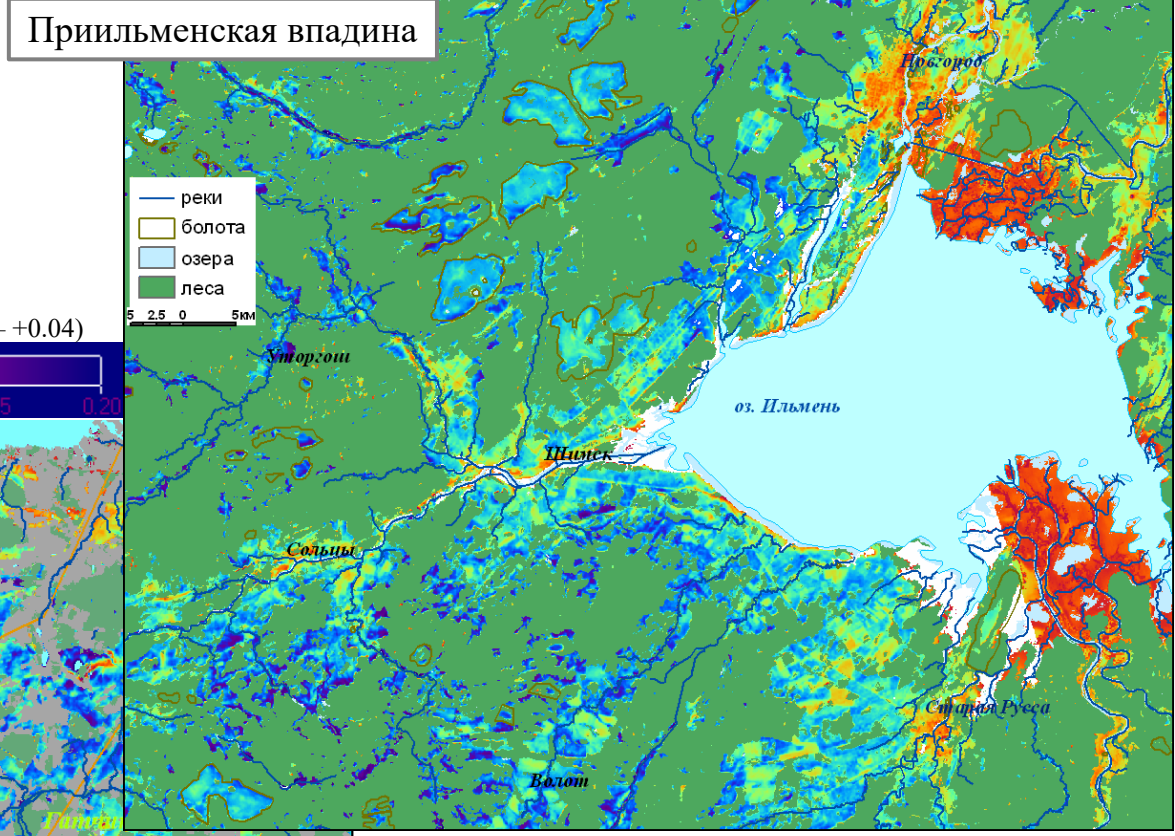
Выводы:

- Адвективно-радиационная природа заморозков, обусловленная взаимосвязью явлений различного пространственного масштаба, определяет необходимость использования данных различного пространственного разрешения, сильно влияющее на качество конечного результата.
- Надёжность карт, полученных по спутниковым данным с разрешением 1.5-2 км, не может поверяться данными метеонаблюдений, поскольку их пространственное разрешение в условиях вероятных ночных инверсий составляет, по-видимому, первые сотни метров.
- Не удается повысить информативность карт и доверие к ним, заполняя пропуски с использованием интерполяции данных реанализа или метеонаблюдений, дающей весьма грубое пространственное разрешение. Различные реализации заполнения дают сходные результаты, отличающиеся небольшими вариациями среднего уровня.
- Перспектива - в использовании данных более высокого разрешения (Landsat). Недостаточное количество данных съёмки Landsat позволяет использовать для картирования лишь подход 2в, использующий связь яркостных температур в точках метеостанций с параметрами распределения минимальных температур воздуха на метеостанциях.

12 2в. Риск заморозка мае-июне R(T<0)

на основе регрессии риска заморозка на 18 метеостанциях по яркостной температуре дневной и ночной съёмки спутниками Landsat 8 и 9 (данные Landsat 8 и 9 за 2023 – 2025 года) и цифровой модели рельефа



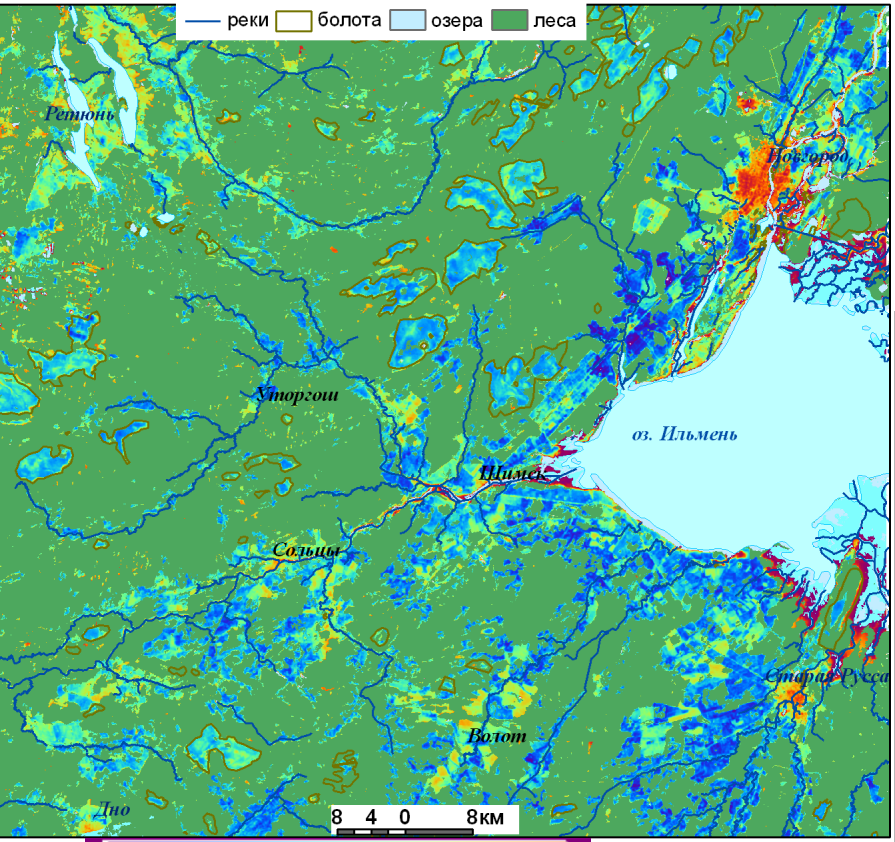


В основе подхода лежат представления о связи риска заморозка R в безоблачных условиях с полуденной $T_{13:00}$ и вечерней $T_{21:00}$ температурами воздуха:
$R=\exp(0.5+0.12\cdot T_{13:00} - 0.38\cdot T_{21:00})$
(Броунов, 1904) .

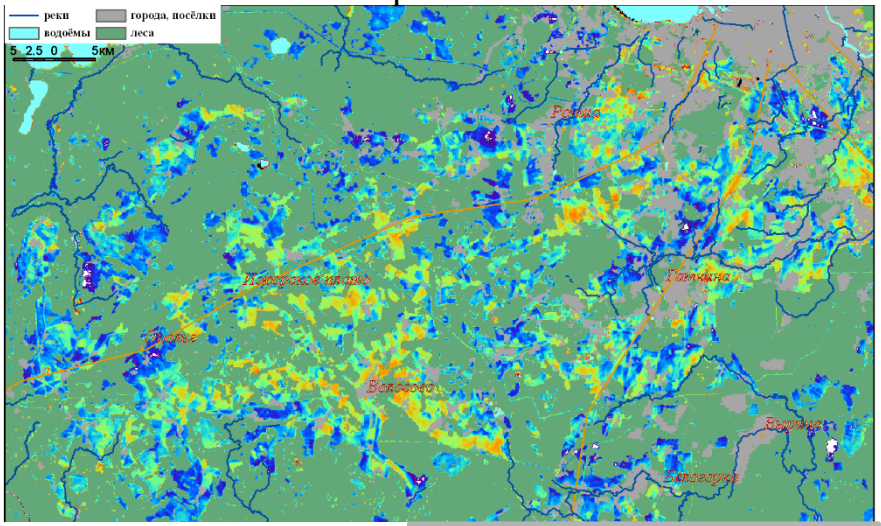
2в. Продолжительность безморозного периода

на основе оценок дат первого/последнего в году заморозка, полученных по 20% процентили распределения этих дат в 2010-2024гг., на 18 метеостанциях и их регрессии по дневной и ночной яркостной температуре поверхности (данные Landsat 8 и 9 за 2023 – 2025 годы) и цифровой модели рельефа

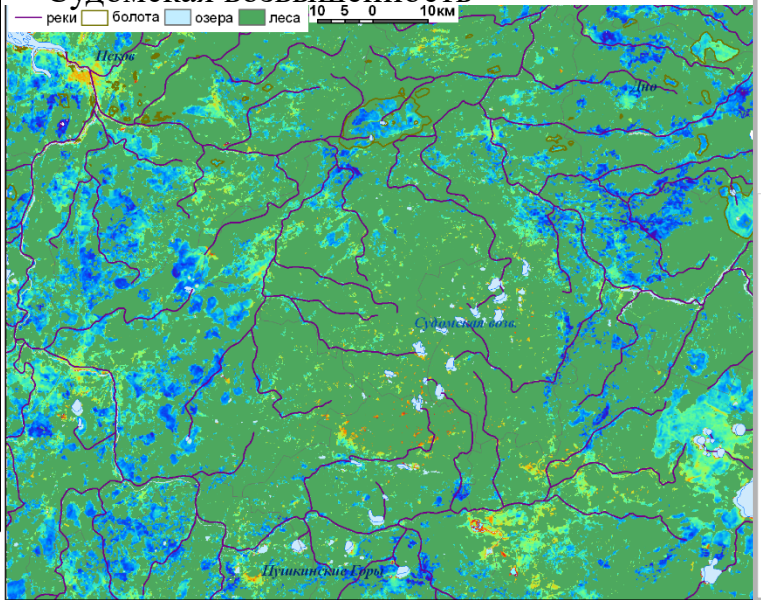
Приильменская впадина



Ижорское плато

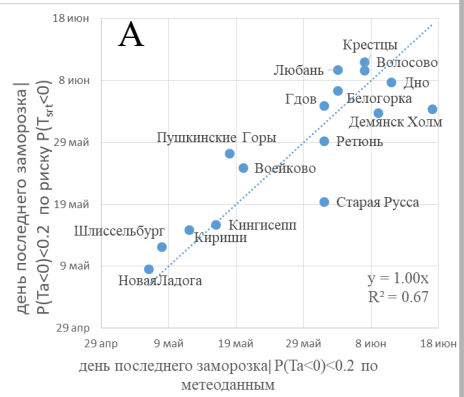


Судомская возвышенность



Зависимость оценки даты последнего в году заморозка по спутниковым данным от даты по метеонаблюдениям

(по 20% процентили распределения дат)



Выводы:

- Надёжность карт, полученных с последовательным использованием двух регрессий не слишком высока, а проверка весьма затруднительна..
- Детальность карт, полученных по данным Landsat с разрешением 100 м, довольно высока и по-видимому соответствует запросам сельского хозяйства.
- В перспективе при использовании правильно построенной сети метеонаблюдений возможна верификация полученных материалов.

Комментарии:

Весенние и осенние заморозки – обычное явление на Северо-Западе, периодически приносящее ущерб овощеводству и садоводству региона. Несмотря на то, что основные закономерности формирования заморозков известны, вопрос дистанционного картирования рисков заморозков освещён слабо. Важным этапом такого картирования является оценка минимальной суточной температуры. Прежде всего определим ключевое понятие….

Расчёт минимальной суточной - предрассветной температуры поверхности можно провести на основе квадратичного или кубического сплайна температуры по времени с использованием двух, привязанных ко времени, измерений – (продукты MOD11A1 и MYD11A1) и времён восхода и захода Солнца (точек минимума и перегиба суточного хода температуры). Фильтрация данных должна быть направлена на снижение вынужденных обусловленных ошибок спутниковой температуры

На слайдах 2 и 3 предрассветные температуры сопоставляются с данными измерений температуры воздуха и поверхности на финских метеобашнях.

1. Вероятность облачности ночью при наличие спутниковых измерений температуры в начале и середине ночи минимальна, что позволяет надеется на низкий уровень ошибок восстановления температуры и снижает уровень ошибок оценок параметров распределения температуры и риска заморозка.
2. Для оценки параметров заморозка надёжнее использовать левую низкотемпературную часть распределения. Это позволяет снизить влияние высоких погрешностей оценки температур поверхности.
3. Сравнение рис. А и Б показывает, что разница температур воздуха на двух метеостанциях расположенных на расстоянии 90 км более вариабельна, чем разница температур поверхности. Это следствие малого – в первые сотни метров – пространственного разрешения метеонаблюдений в ночных условиях, при высокой вероятности инверсий.
4. Сравнение уравнений регрессий на рис. А,Б,В также подтверждают этот факт – свободные члены, отвечающие за пространственную изменчивость отличаются на 1.5С

К 4 На этапе картирования потребуются, однако, оценки параметров совместного распределения предрассветной температуры и минимальной температуры воздуха. На исследуемой территории этому мешает ее низкая (количество ясных ночей в мае-июне 25-45 %) и выборочная (оценки есть только для относительно холодных ночей) представительность спутниковых данных. Синхронные оценкам предрассветной температуры минимальные температуры воздуха на метеостанциях также как «генеральная совокупность» имеют нормальные распределения. Это позволяет, используя параметры этих распределений и совместного распределения предрассветных температур и минимальных температур воздуха рассчитать в каждой точке параметры полного по времени распределения минимальных температур, и получить близкие к реальности оценки картируемых статистик заморозков. Для этого потребуется интерполяция данных метеонаблюдений или реанализа.

К 6 1. Сравнение рисков заморозка как условной вероятности ($Риск(T<0) = P(srT<0) \cdot P(ясная\ ночь)$) с рисками в точках метеостанций показывает их небольшую недооценку, которую можно откорректировать, что и было сделано.

2. Значительные разногласия в оценках риска на некоторых метеостанциях показывают высокую вероятность локальных мезоклиматических неоднородностей, размер которых меньше пространственного разрешения данных MODIS – первые сотни метров. Наиболее вероятной причиной этих неоднородностей являются различия в гидрологическом режиме территорий, между болотами (Холм), где риски заморозка по метеоданным весной высоки, и хорошо дренируемыми камами (Пушкинские Горы), где риски, напротив, низкие.

К 7 Использование регрессии минимальных температур воздуха на метеостанциях по характеристикам рельефа, доли безлесных территорий и риску заморозка по предрассветной температуре.

Достоинства:

5. Используем полный ряд (генеральную совокупность) температур воздуха.
6. Можем оценить погрешности рисков заморозка, но только на метеостанциях.
7. Учитывается влияние локальных климатических факторов.

Недостатки :

8. Параметры регрессий оцениваются по малому числу точек.
9. Метеостанции расположены в населенных пунктах и не отражают всю широту вариаций диапазона мезо-климатических факторов.
10. Масштаб влияния того или другого мезо-климатического фактора должен быть согласован с пространственным разрешением используемых для его описания данных. Это отдельная оптимизационная задача, до конца не решенная в рамках представленной работы.

К 8 Использование регрессии минимальных температур воздуха на метеостанциях по характеристикам рельефа, доли безлесных территорий и риску заморозка по предрассветной температуре.

Достоинства:

11. Используем полный ряд (генеральную совокупность) температур воздуха.
12. Можем оценить погрешности рисков заморозка, но только на метеостанциях.
13. Учитывается влияние локальных климатических факторов.

Недостатки :

14. Расхождение регрессионных оценок риска с данными наблюдений даже в точках метеостанций слишком велико.
15. Параметры регрессий оцениваются по малому числу точек.
16. Метеостанции расположены в населенных пунктах и не отражают всю широту вариаций диапазона мезо-климатических факторов.
17. Масштаб влияния того или другого мезо-климатического фактора должен быть согласован с пространственным разрешением используемых для его описания данных. Это отдельная оптимизационная задача, до конца не решенная в рамках представленной работы.
18. Без учета характеристик распределения предрассветной температуры карта рисков неоправданно сильно зависит от высот рельефа.

Комментарии:

К 9 Заполнение пропусков в рядах предрассветной температуры с использованием ежедневных минимальных температур – результатов кригинга данных на метеостанциях, или интерполяции данных реанализа (куба данных) проводится для каждого пиксела в два этапа. Сначала формируется выборка температур для дат съёмки и рассчитываются коэффициенты линейной регрессии предрассветной температуры по минимальной температуре воздуха/поверхности (по ежедневным данным). Затем в соответствии с полученным уравнением заполняются пропуски в рядах предрассветной температуры. Коэффициент детерминации для регрессий лежит обычно в пределах 0.75-0.98. Угловой коэффициент отражает, вероятно степень дренируемости территории – для хорошо дренируемых областей он больше (>1?), а для болот меньше (<0.85?).

Достоинства:

1. Используем полный ряд (генеральную совокупность) предрассветных температур.
2. Можем оценить погрешности, этапа заполнения пропусков температур и рисков заморозка.

Недостатки :

3. Параметры регрессии отражают взаимосвязь температур в ясные ночи, но в облачную погоду эти параметры скорее всего будут другими. это сложно учесть.
4. Температура, построенная на основе интерполяции данных, является грубым приближением, поскольку влияние локальных климатических факторов не учитывается.

К 10 Для оценки параметров заморозка после заполнения пропусков использовалась левая низкотемпературная часть распределения. Полученные таким образом оценки были откорректированы на угловой коэффициент регрессии рисков на рис А – среднее отношение риска заморозка по полному ряду температур воздуха к риску заморозка в дни съёмок.

5. Полученные карты (3а, 3б, 3в) похожи на карту на слайде 5 и между собой в том числе и по взаиморасположению точек метеостанций на графиках под картами и отличаются только средним уровнем риска. Влияние на пространственные вариации рисков источника данных для заполнения пропусков незначительно.
6. Для некоторых метеостанций расхождение оценок риска по полному ряду предрассветных температур с риском по температуре воздуха слишком велико.

К 12 В основе карт на слайдах 12 и 13 лежит решение, полученное на слайде 7 для риска заморозка по предрассветной температуре поверхности P(srT<0), которое определяется главным образом параметрами распределения предрассветной температуре поверхности. Регрессия P(srT<0) по дневной и ночной яркостным температурам по данным Landsat определяет карты на слайде 12.

Достоинства:

7. Детальность карт существенно выше и по-видимому соответствует запросам сельского хозяйства.

Недостатки:

1. Неопределимый уровень погрешности.
2. Проблематичность построения карт для больших территорий, требующих построения мозаики.
3. Использование одной (ночной) сцены яркостной температуры может внести ошибки, связанные с неоднородностью атмосферы в момент съёмки.

К 13 В основе карт на слайдах 12 и 13 лежит решение, полученное на слайде 7 для риска заморозка по предрассветной температуре поверхности P(srT<0), которое определяется главным образом параметрами распределения предрассветной температуре поверхности. Регрессия P(srT<0) по дневной и ночной яркостным температурам по данным Landsat определяет карты на слайде 12. Используя зависимость дат первого и последнего заморозков в сезоне по данным наземных наблюдений (по 20% процентили распределения этих дат) от риска заморозка по предрассветной температуре поверхности можно оценить даты первого и последнего заморозков и продолжительность безморозного периода (пример сравнения таких оценок с данными метеостанций на рис А). А в дальнейшем построить представленные на слайде 13 карты продолжительности безморозного периода (с вероятностью 20%)

Достоинства:

8. Детальность карт довольно высока и по-видимому соответствует запросам сельского хозяйства.

Недостатки:

1. Неопределимый уровень погрешности.
2. Проблематичность построения карт для больших территорий, требующих построения мозаики.
3. Использование одной (ночной) сцены яркостной температуры может внести ошибки, связанные с неоднородностью атмосферы в момент съёмки.