

# Анализ многолетней динамики температурного режима Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай) на основе данных Landsat

Е.А.Мамаш<sup>1</sup> И.А.Пестунов<sup>1</sup>, С.Я.Кудряшова<sup>2</sup>, С.А.Чумбаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий

<sup>2</sup>Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

2023

# Обоснование актуальности исследования

- **Температура земной поверхности (Land Surface Temperature (LST))** играет ключевую роль в различных климатологических, метеорологических, гидрологических исследованиях, а также в рациональном природопользовании и при проведении сельскохозяйственных работ [Anderson et al, 2012; Fisher, 2017].
- Реализация инновационного проекта РФ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» предполагает получение объективных данных изменения климатических характеристик атмосферы и суши и создание системы наблюдения за таянием многолетней мерзлоты с использованием возможностей спутниковых данных и их валидации на основе прямых измерений на региональном уровне.
- Согласно результатам изучения количественных показателей температурных полей почв, полученных как в нашей стране, так и за рубежом, было установлено, что использование возможностей спутниковых данных и их валидации на основе прямых измерений, позволяют выявлять особенности проявления факторов почвообразования и историю землепользования в разных климатических зонах [Мамаш и др., 2022 ; Anderson et al., Arrouays et al., 2017; 2020; Voronina et al., 2021; Kudryashova et al., 2018; 2020; Fisher et al., 2017].
- Важной является проблема выявления масштабов современного ирригационного воздействия на условия формирования температурных полей структурных единиц почвенного покрова и оценка степени влияния посторошения на их количественные показатели с использованием временных рядов космических снимков.

# Обоснование выбора объекта исследования

- Многочисленные археологические находки специализированных земледельческих орудий и ирригационных сооружений свидетельствуют, что территория Чуйской сухостепной котловины Горного Алтая является областью широко развитого **древнего орошаемого земледелия** [Соенов, 2003; Вдовина, 2004]. Начало современного ирригационного строительства связано с освоением **промышленных запасов Курайского, Чаган-Узунского и Акташского ртутных месторождений**. Рост численности населения, занятого в сооружении объектов Чаган-Узунского перерабатывающего предприятия, постоянно требовал решения продовольственной проблемы.
- Масштабное внедрение оросительных мелиораций в Чуйской степи дало возможность существенно повысить продуктивность кормовых культур – необходимой базы животноводства.
- Для претворения программы, намеченной постановлением Всероссийского центрального исполнительного комитета и Совета народных комиссаров РСФСР “О мероприятиях в ознаменование десятилетия Ойротской автономной области” (1932 г), были выполнены первые исследования и составлены технико-экономические обоснования **орошения Чуйской и Курайской котловин**.
- С вводом в эксплуатацию ирригационной сети “**обновились веками пустовавшая Чуйская степь**”, однако, избыточное многолетнее орошение стало причиной прогрессирующего заболачивания и проявления мерзлотных явлений. Было принято решение о нецелесообразности эксплуатации гидромелиоративной системы, и некогда орошаемый массив с крупнейшей коллекцией многолетних трав вновь стал пастбищным участком сухой степи.
- **В настоящее время**, согласно данным ФГБУ Управления Мелиоводхоз по Республике Алтай в Чуйской степи на площади более 2 тыс. га функционируют Тархатинская, Елангашская и Чаган-Бургазинская оросительные системы [Кречетова, 2020].

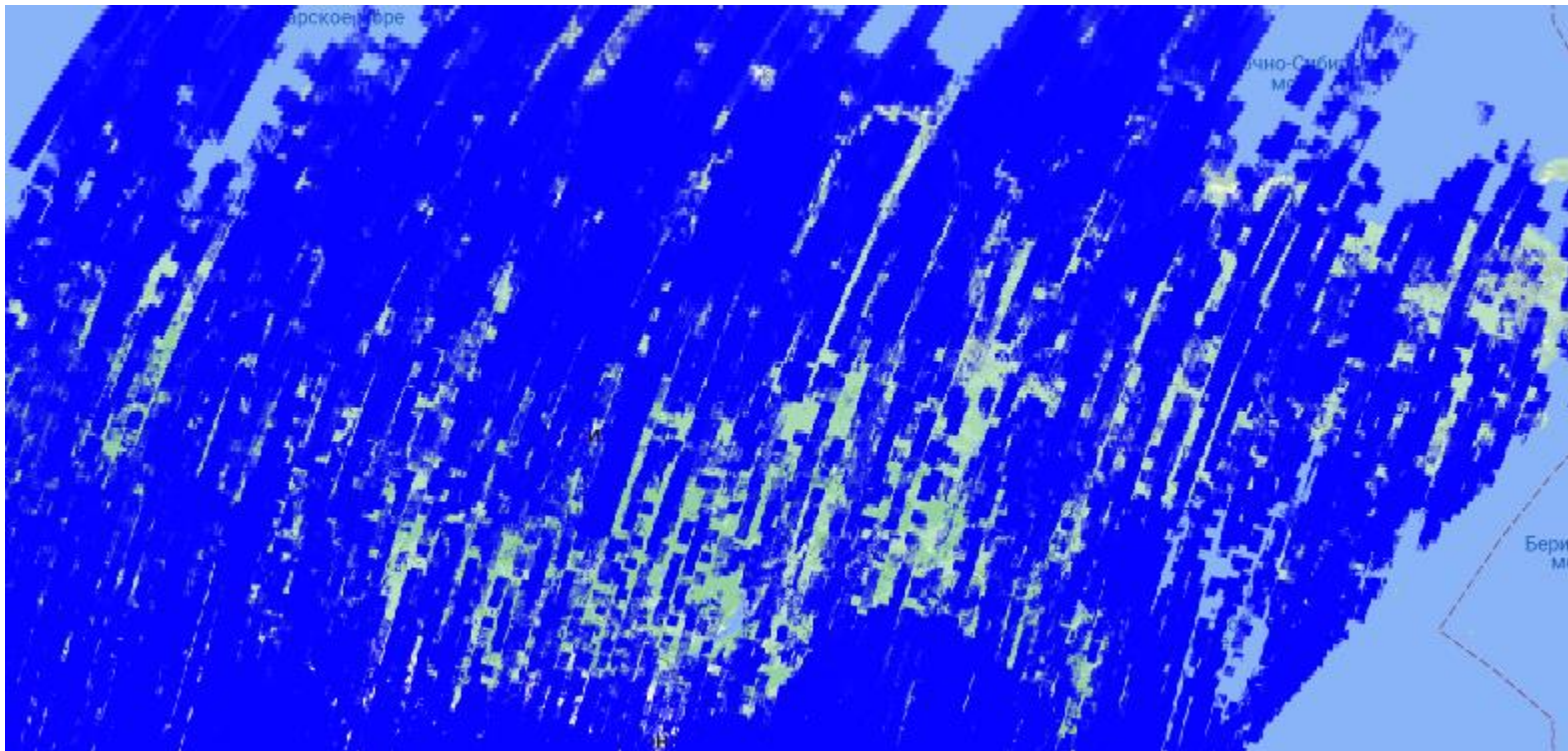
# Спутниковые данные и алгоритмы

- Одним из наиболее часто используемых источников спутниковой информации о температуре земной поверхности являются данные спутников серии **Landsat**, из которых чаще всего востребованы данные спутников Landsat - 4,5,7,8. Программа Landsat успешно предоставляет тепловую информацию о земной поверхности в течение почти 4-х десятилетий с периодичностью в две недели. В последнее время (с сентября 2021 г.) коллекции данных Landsat начали пополняться новыми данными со спутника Landsat - 9. Спутники Landsat - 8,9 оснащены тепловым инфракрасным датчиком (TIRS), ведущим съемку в двух тепловых каналах: 10 (10,60 - 11,19 мкм) и 11 (11,50 -12,51 мкм) с номинальным пространственным разрешением 100 м.
- **Геологическая служба США (USGS)** в рамках создания научных продуктов (Science products) второго уровня (L2SP) начала выпуск оперативного продукта LST (L8\_ST и L9\_ST), получаемого на основе данных Collection 2 Level-1 [Cook et al, 2014]. Этот продукт основан на решении уравнения радиационного переноса, примененном к микроволновому диапазону (L8,9/TIRS). Для реализации процедуры атмосферной коррекции в данном случае используются данные Североамериканского регионального реанализа (NARR), а для выполнения расчетов радиационного переноса используется программа MODTRAN.
- Коррекция излучательной способности для этого продукта основана на данных **Aster Global Emissivity Dataset (Aster-GED)** [Hulley et al, 2015], которые, в свою очередь, используют значения вегетационного индекса ASTER NDVI. Продукт L8\_ST доступен с 16-дневным периодом через веб-сайт Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), доступ открыт с 1 марта 2022 г.) Коллекция данных L2 также представлена в системе доступа и обработки спутниковых данных Google Earth Engine (GEE).

# Валидация

- В последнее время начинают появляться публикации, связанные с валидацией этого достаточно нового продукта на основе наземных измерений и сравнения результатов валидации продуктов L2 с результатами собственных вычислений на основе различных алгоритмов атмосферной коррекции и алгоритмов вычисления значений температуры, где коэффициент эмиссии вычисляется на основе NDVI и учитывает контраст между инфракрасным и красным изображениями на подстилающей поверхности, полностью покрытой растительностью и голой почвой [*Galve et al, 2022; Dyba et al, 2022*].
- Результаты валидации показывают наличие систематической ошибки продукта L2, в большинстве случаев в сторону завышения. В работе (Dyba et al, 2022) предложена формула для коррекции значений продукта L2 применительно к водным объектам.
- S. Ermida [*Ermida et al, 2020* ] предложен алгоритм подсчета LST для серии спутников Landsat, начиная с Landsat 4 в системе GEE, где представлены в открытом доступе все вычислительные модули.
- К недостаткам этого алгоритма можно отнести необходимость использования данных Aster-GED для вычисления коэффициента эмиссии, покрытие которыми на территории России обладает рядом пробелов и может быть использовано далеко не всегда.

# Фрагмент покрытия данными Aster-GED на территории России



# Цели работы:

- модификация алгоритма вычисления LST, представленного S. Ermida [*Ermida et al, 2020*] с использованием альтернативного способа вычисления поверхностной эмиссии, его валидация на основе наземных данных, сравнение с продуктом L2SP и алгоритмом S. Ermida.
- применение разработанного алгоритма для анализа многолетней динамики температурного режима Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай)

# Алгоритм вычисления LST

1. Коэффициент эмиссии подсчитывается на основе значения FVC :

$$FVC = \left( \frac{NDVI - NDVI_{bare}}{NDVI_{veg} - NDVI_{bare}} \right)^2$$

Здесь  $NDVI_{bare}$  и  $NDVI_{veg}$  - это пороговые значения, соответствующие голой почве и почве, полностью покрытой растительностью. В нашем случае эти значения равны 0.2 и 0.86 соответственно как и в работе [Ermida et al, 2020], которая в свою очередь ссылается на исследования J. Jiménez-Muñoz и др. [Jiménez-Muñoz, et al, 2009]



2. Исходя из значений  $FVC$ , значения эмиссии поверхности могут быть получены на основе так называемого метода “растительного покрова” [Rubio et al, 1997, Caselles et al, 1997] и вычисляются как

$$\varepsilon_b = FVC \varepsilon_{b,veg} + (1 - FVC) \varepsilon_{b,bare}$$

где  $\varepsilon_{b,veg}$  и  $\varepsilon_{b,bare}$  излучательная способность поверхности, полностью покрытой растительностью и голой почвы соответственно для данного спектрального канала  $b$ . В алгоритме, предложенном в [Ermida et al, 2020] значение считается постоянным и равным 0.99, тогда как значения  $\varepsilon_{b,bare}$  вычисляются на основе данных ASTER GEDv3.

Альтернативный алгоритм подсчета эмиссии, описанный J.A. Sobrino [Sobrino, 2008]:

$$\varepsilon_b = \begin{cases} \varepsilon_{b,bare}, & NDVI < NDVI_{bare} \\ FVC \varepsilon_{b,veg} + (1 - FVC) \varepsilon_{b,bare}, & NDVI_{bare} \leq NDVI \leq NDVI_{veg} \\ \varepsilon_{b,veg}, & NDVI > NDVI_{bare} \end{cases}$$

где  $\varepsilon_{b,bare}$  постоянная и равная 0,97. Это значение получено, исходя из ряда исследований [Li et al, 2013, Dash et al, 2005].

3. LST вычисляется на основе алгоритма SMW (Statistical Mono-Window) [Duguay-Tetzlaff, 2015], где кроме данных LST и эмиссии используются атмосферные данные реанализа National Center for Environmental Prediction (NCEP) и National Center for Atmospheric Research (NCAR), доступные в GEE. В результате модель представляет собой линеаризацию уравнения радиационного переноса, в котором сохраняется явная зависимость от излучательной способности [Ermida et al, 2020]:

$$LST = A_i \frac{T_b}{\varepsilon} + B_i \frac{1}{\varepsilon} + C_i,$$

где  $T_b$  – яркостная температура ТОА в канале TIR,  $\varepsilon$  – излучательная способность поверхности для того же канала, коэффициенты  $A_i, B_i, C_i$  получаются при построении моделей радиационного переноса на основе набора данных профилей температуры воздуха, водяного пара и озона.

# Наземные исследования

Наземные измерения проводились с использованием автоматизированных регистраторов температуры DS-1921 “Thermochron”. Для сопоставления наземных данных с данными ДЗЗ изменения температур на поверхности почвы фиксировалась в течение вегетационного периода 2022 г (15.07.2022-27.10.2023) с учетом времени пролета спутника над исследуемой территорией (12.00).






Для валидации данных LST были выбраны ключевые участки на территории распространения орошаемых и посторошаемых земель сухостепных котловин Республики Алтай (2022-2023 гг.):

- **1 участок** - староорошаемый и неорошаемый массивы гидросистемы Кокоря (точки А1, А2);
- **2 участок** - это староорошаемый участок Тархатинской оросительной системы (точка А3)
- **3 участок** - это староорошаемый участок Елангашской оросительной системы (точка А4).
- **4 тестовый** участок сухой степи, расположенный вне зоны орошения (точки А4, А5).

# Ключевые участки



Условные обозначения:

-  оросительные каналы староорошаемой гидросистемы Кокоря (А1)
-  неорошаемый массив гидросистемы Кокоря (А2)
-  поливной староорошаемый массив дождевальной машины кругового действия "Фрегат" Тархатинской оросительной системы (А3)
-  старорошаемый массив оросительной системы Еланташ (А4)
-  контрольный участок сухой степи, расположенный вне зоны орошения (А5)

# Статистические оценки

Для получения статистических оценок мы воспользовались, наряду с стандартной оценкой сдвига MBE (Mean Bias Error), робастными статистическими оценками [ *Guillevic, 2020* ] и RMSE (Root Mean Square Error) :

- медианная ошибка  $\mu$ , которая является робастным эквивалентом сдвига (MBE)

$$\mu = \text{median}(LST_{\text{sat}} - LST_{\text{insitu}})$$

- робастный эквивалент стандартного отклонения, которым является медиана абсолютных остатков:

$$\sigma_{\mu} = \text{median} |(LST_{\text{sat}} - LST_{\text{insitu}}) - \mu|$$

- среднеквадратическая ошибка RMSE, как оценка расстояния между двумя точками:

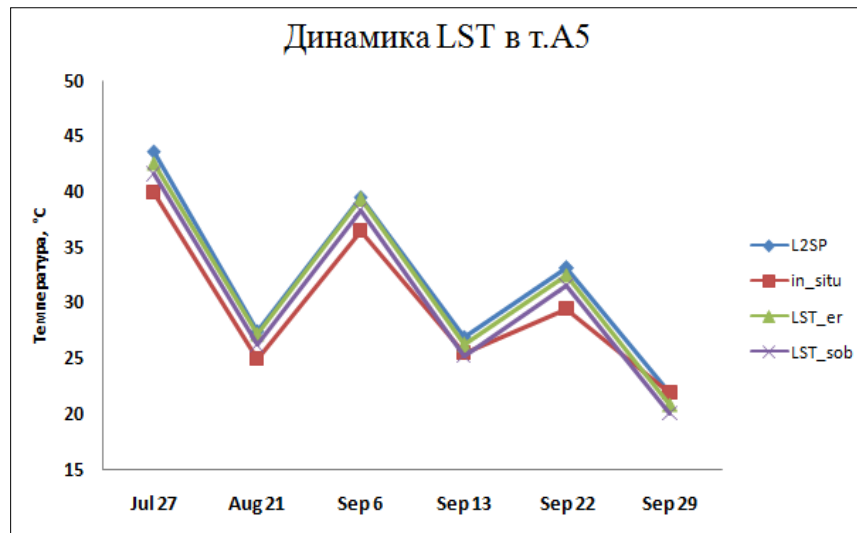
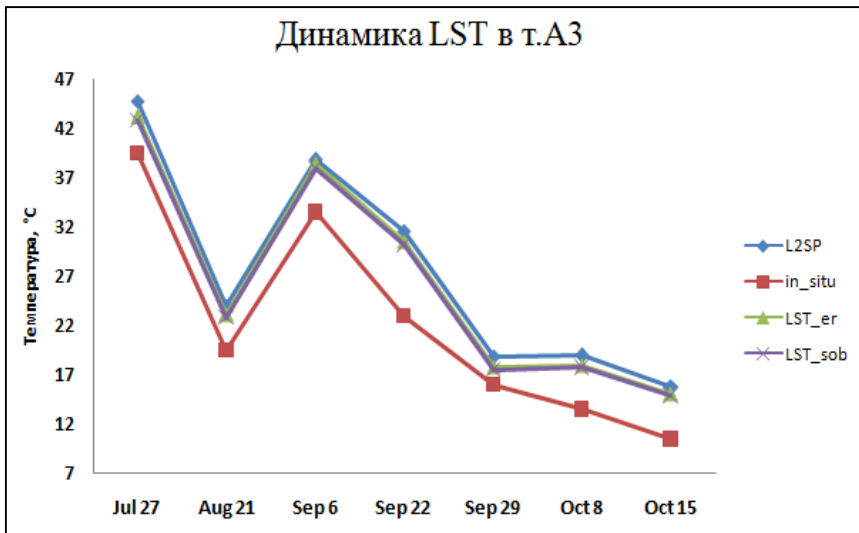
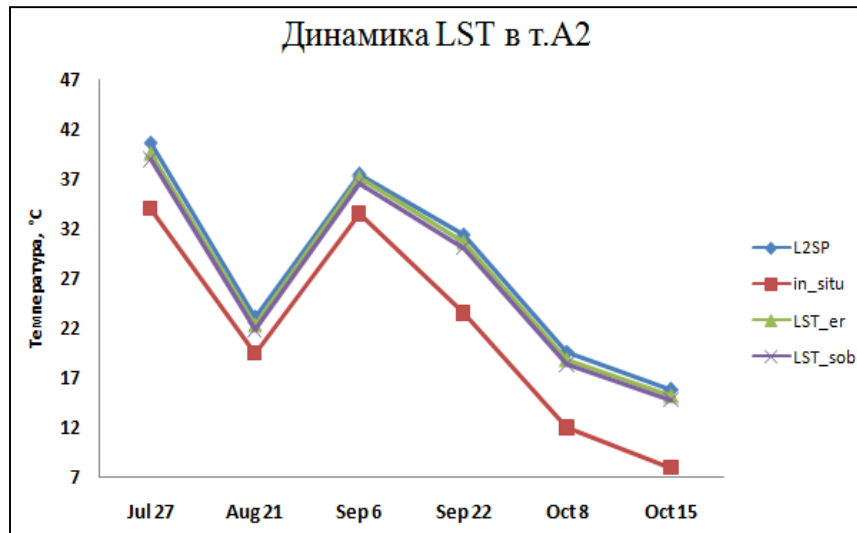
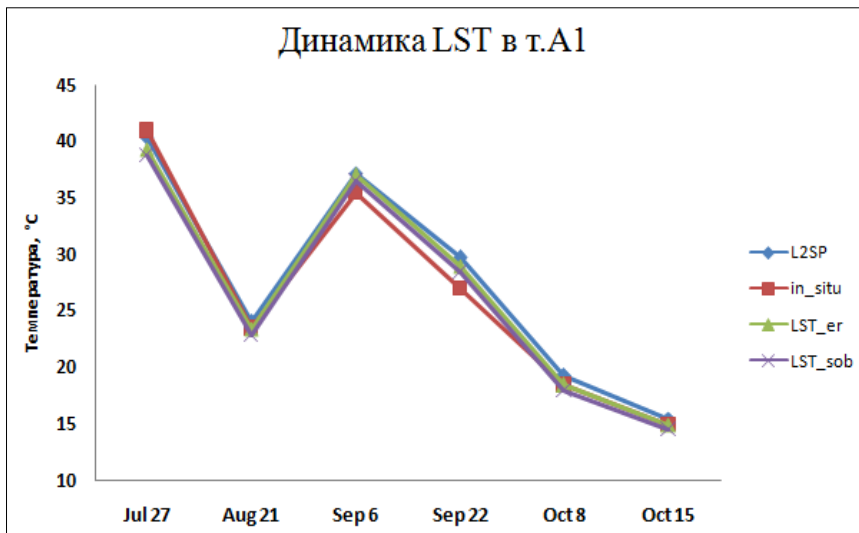
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (LST_{\text{sat}} - LST_{\text{insitu}})^2}{N}}$$

$N$  – число измерений.

# Результаты

	<i>MBE</i>	$\mu$	$\sigma_{\mu}$	<i>RMSE</i>	<i>R</i>
<i>A1(N=6)</i>					
<b>L2SP</b>	-0.96	-0.66	0.61	1.42	0.99
<b>LST_er</b>	-0.31	0.01	0.81	1.24	0.99
<b>LST_sob</b>	0.18	0.44	0.80	1.21	0.99
<i>A2(N=6)</i>					
<b>L2SP</b>	-6.27	-7.17	0.72	6.53	0.98
<b>LST_er</b>	-5.60	-6.23	1.01	5.85	0.99
<b>LST_sob</b>	-5.03	-5.67	1.02	5.32	0.99
<i>A3(N=7)</i>					
<b>L2SP</b>	-5.34	-5.32	0.14	5.56	0.98
<b>LST_er</b>	-4.39	-4.50	0.83	4.67	0.99
<b>LST_sob</b>	-4.09	-4.27	0.92	4.38	0.99
<i>A4(N=7)</i>					
<b>L2SP</b>	-4.52	-4.51	0.95	4.69	0.99
<b>LST_er</b>	-3.91	-4.63	0.13	4.12	0.99
<b>LST_sob</b>	-2.92	-3.47	0.16	3.18	0.99
<i>A5(N=6)</i>					
<b>L2SP</b>	-2.40	-2.80	0.89	2.74	0.99
<b>LST_er</b>	-1.74	-2.42	0.54	2.28	0.99
<b>LST_sob</b>	-0.79	-1.45	0.54	1.63	0.99

# Графики динамики температуры в точках мониторинга



## Анализ многолетней динамики температурного режима Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай)

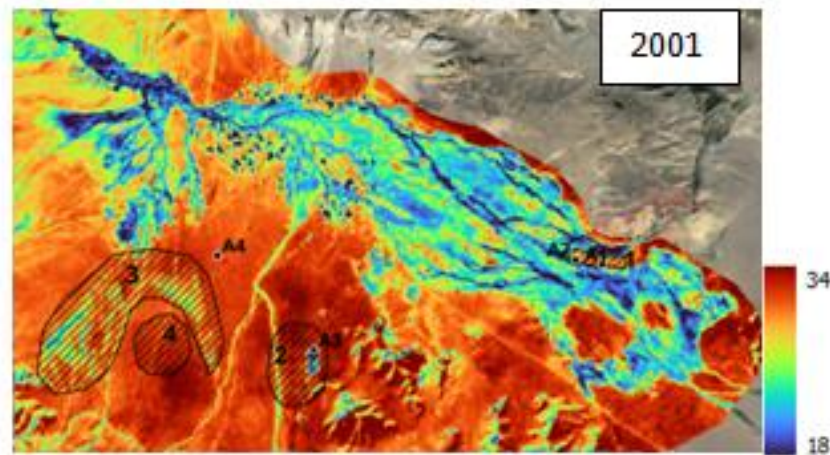
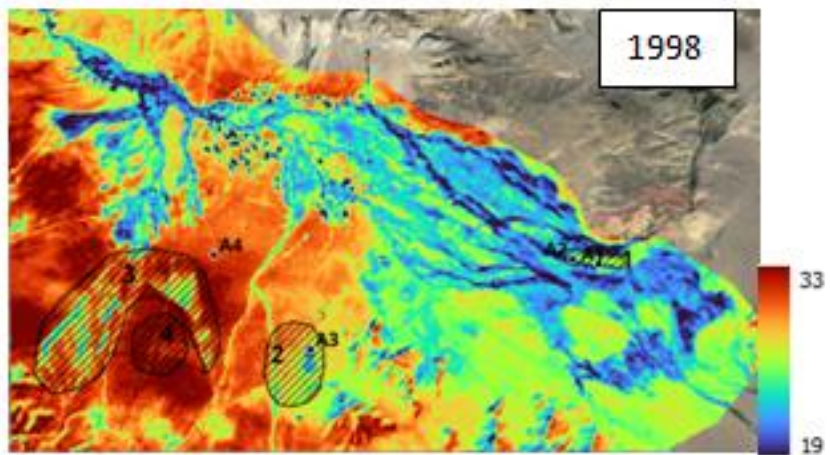
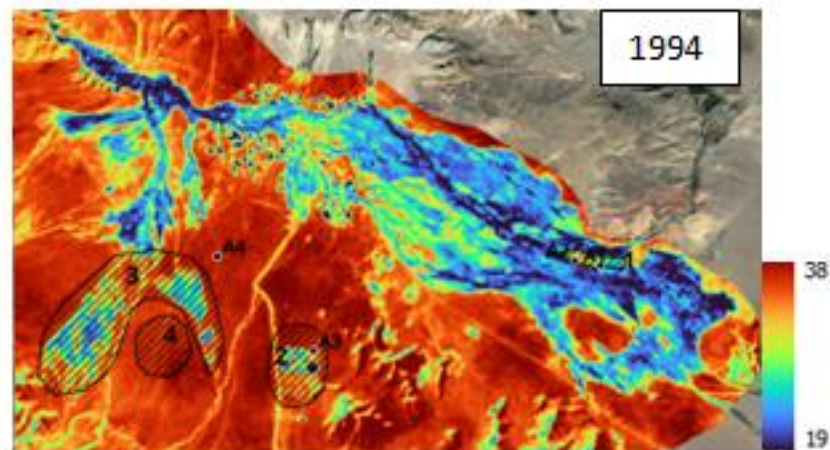
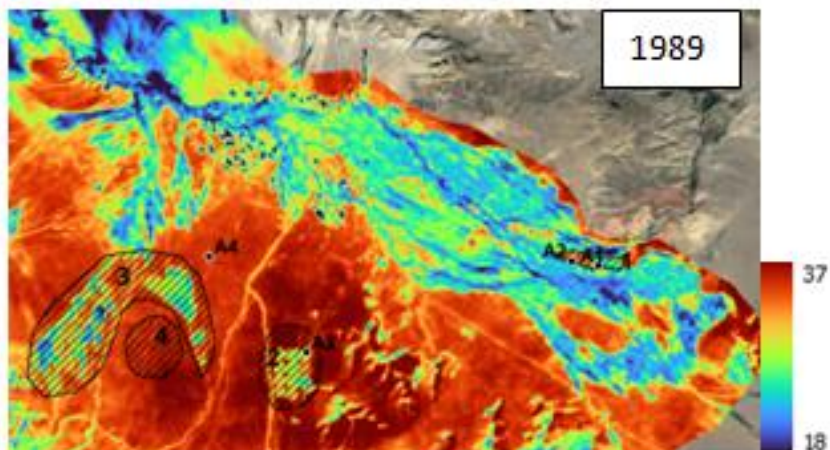
Для анализа динамики температурного поля на территории Чуйской котловины были отобраны 8 снимков с минимальной облачностью за разные годы, примерно в одно и тоже время (конец августа-начало сентября) с промежутком 3-5 лет. В таблице приведена пространственная статистика по каждому году.

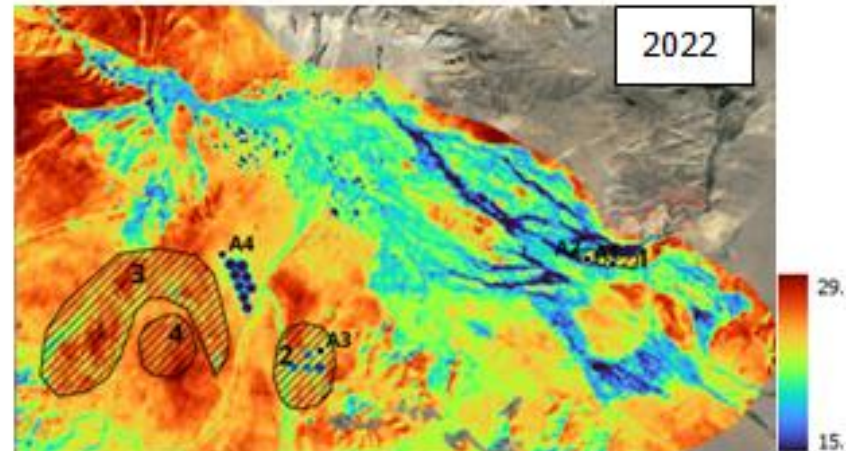
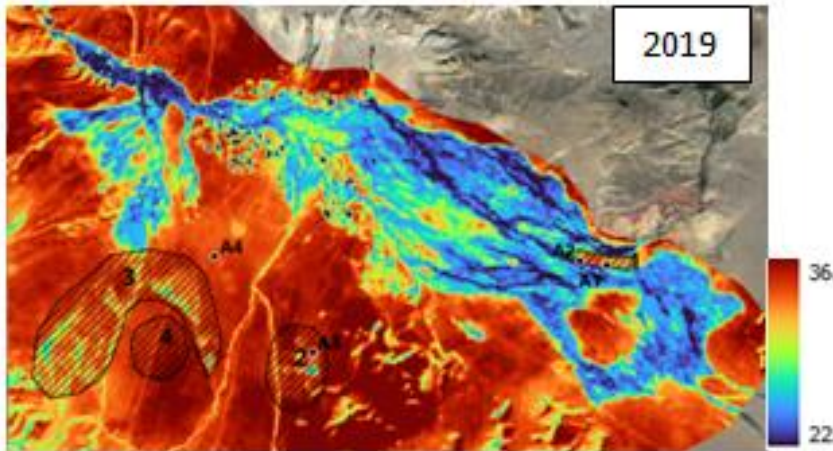
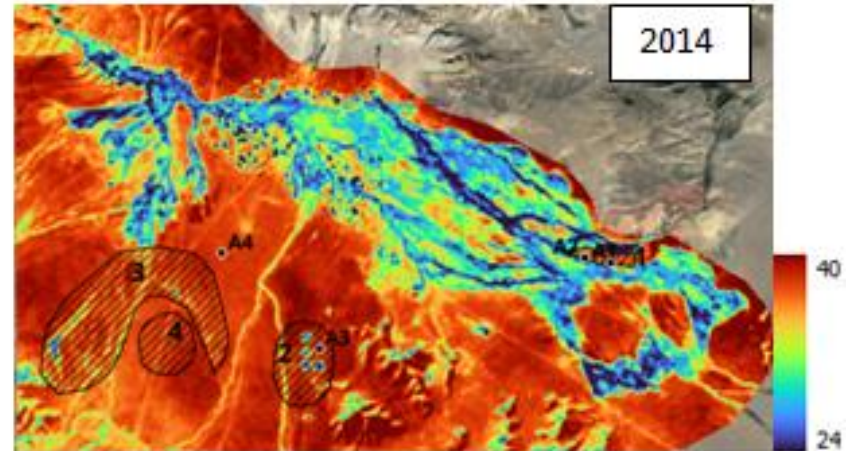
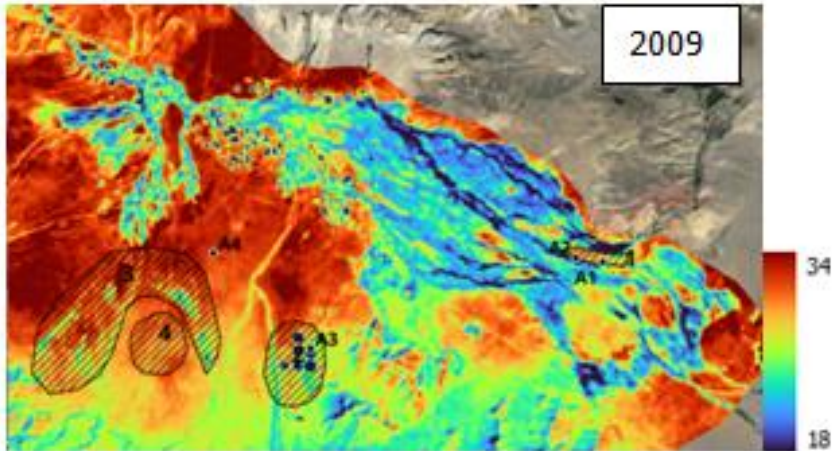
<b>N</b> <b>п/п</b>	<b>Дата</b>	<b>Спутник</b>	<b>Mean</b>	<b>Median</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Range</b>	<b><math>\sigma</math></b>
1.	03.09.1989	Landsat 4	30.58	31.99	10.93	42.89	31.96	5.14
2.	24.08.1994	Landsat 5	31.89	34.15	13.96	42.72	28.76	5.52
3.	04.09.1998	Landsat 5	27.39	27.35	12.16	37.39	25.23	3.73
4.	04.09.2001	Landsat 7	28.61	29.73	10.9	41.68	30.78	4.06
5.	17.08.2009	Landsat 8	28.27	28.67	12.05	39.22	27.17	4.26
6.	31.08.2014	Landsat 8	35.12	36.82	16.98	45.93	28.95	4.4
7.	29.08.2019	Landsat 8	31.88	33.54	17.97	42.32	24.35	4.35
8.	21.08.2022	Landsat 8	23.75	24.28	11.58	33.47	21.89	3.01

□

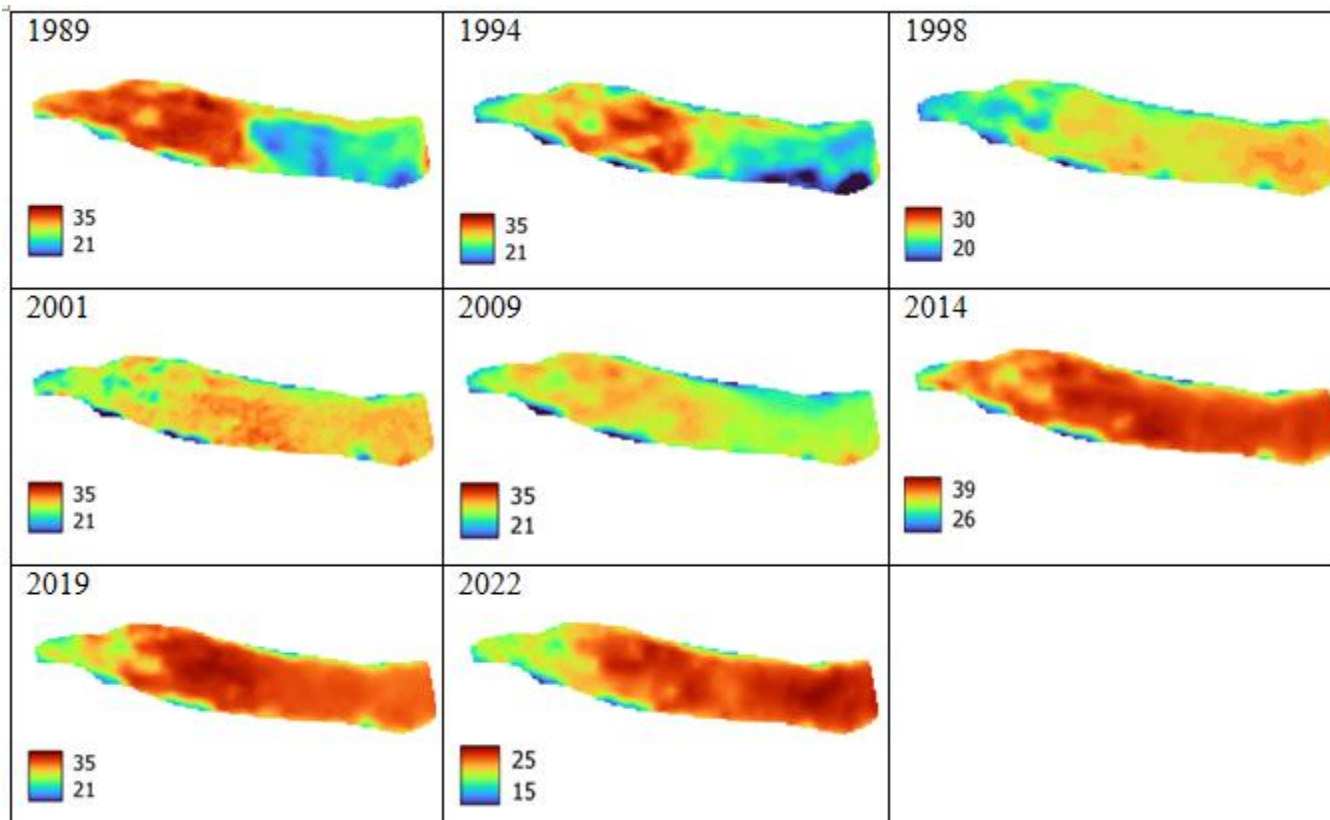


# Картосхемы распределения LST по годам

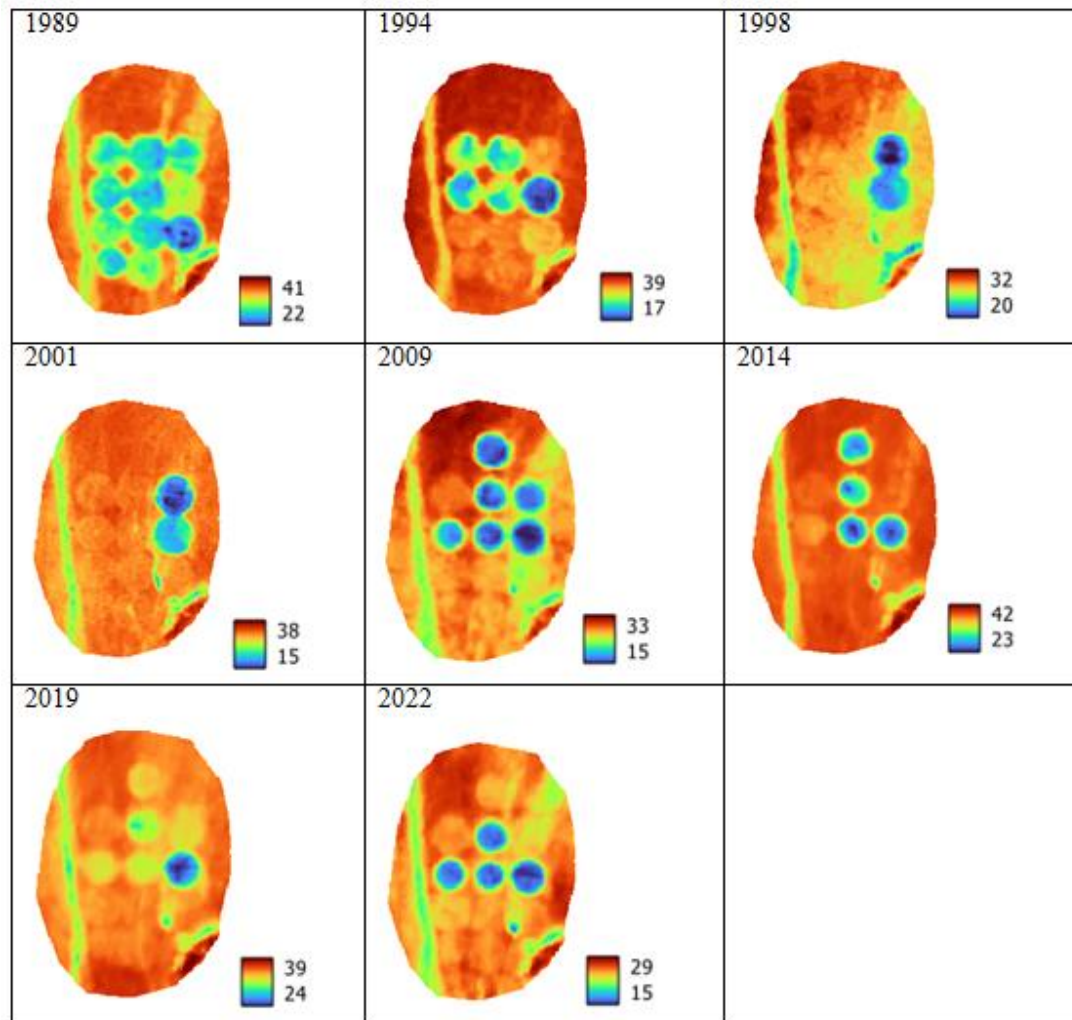




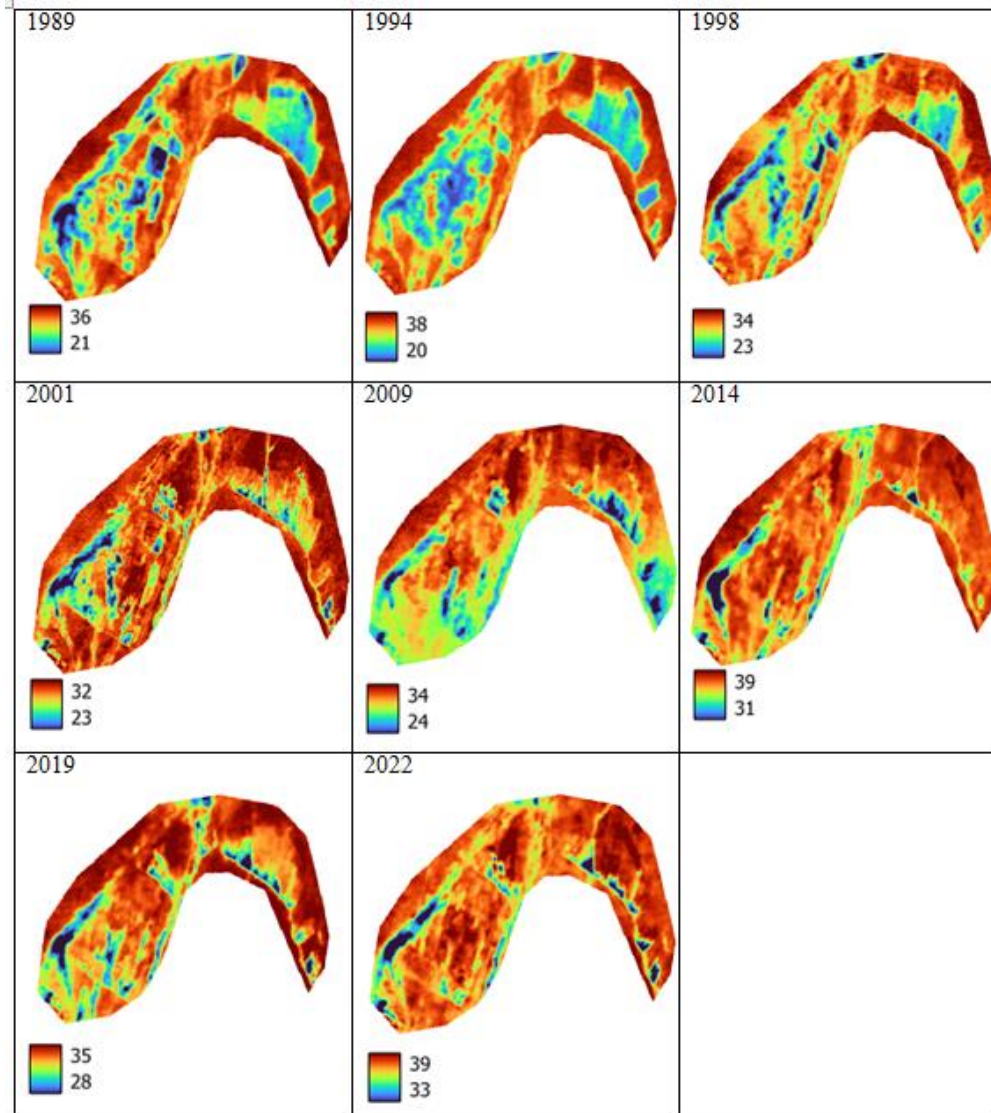
# Распределение LST за 1989-2022 гг. на участке 1: гидросистемы Кокоря



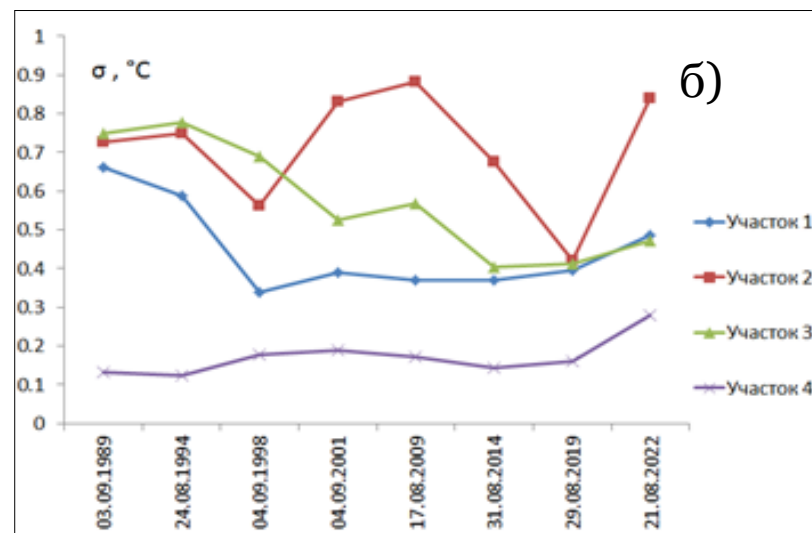
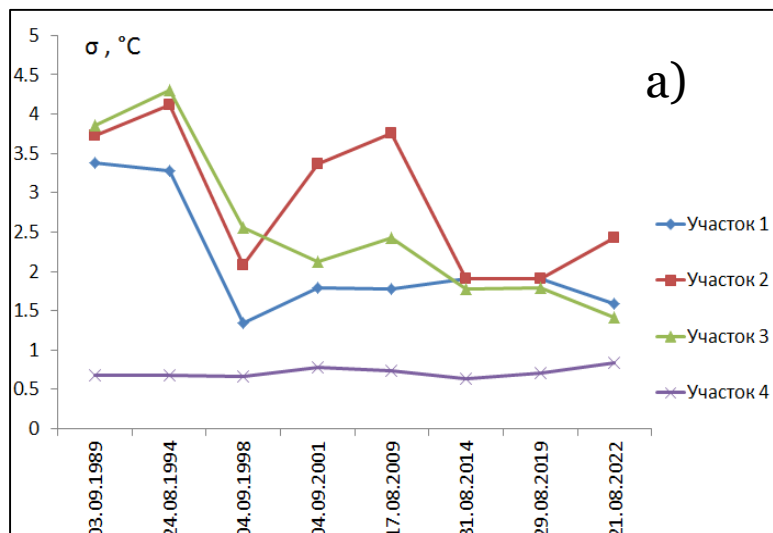
# Распределение LST за 1989-2022 гг. на участке 2: староорошаемый участок Тархатинской оросительной системы



# Распределение LST за 1989-2022 гг на участке 3: старорошаемый участок Елангашской оросительной системы



## Графики динамики среднеквадратичного отклонения $\sigma$ для LST на ключевых участках: а) измеренные значения б) после стандартизации



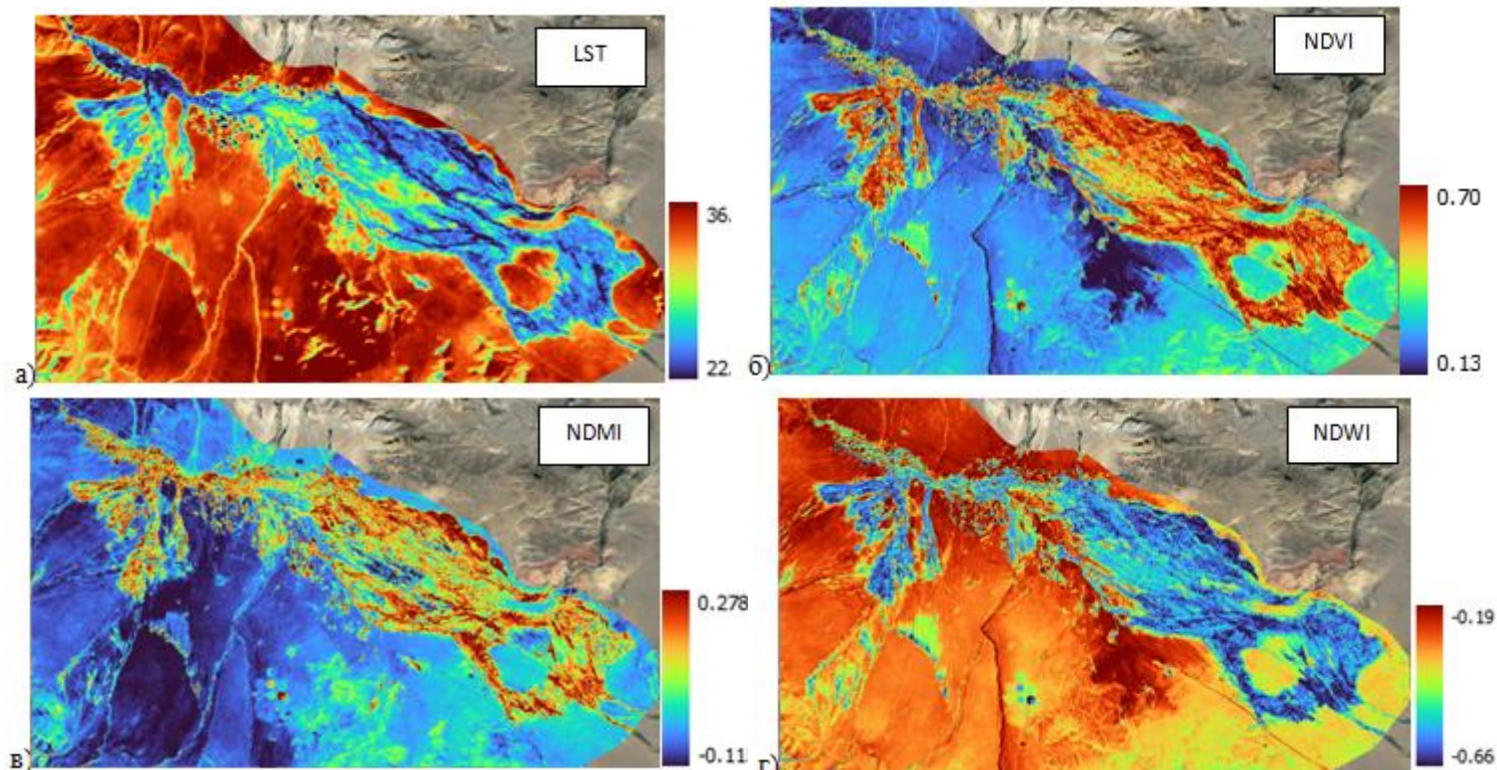
Исследована зависимость  $\sigma$  от погодных факторов, таких как среднее и медиана значений температуры на момент съемки. Коэффициент корреляции  $R(\text{Mean}, \sigma)=0,70$   $R(\text{Median}, \sigma)=0,75$ . При вычислении коэффициента корреляции, начиная с 1998 года, зависимость увеличивается:  $R(\text{Mean}, \sigma)=0,8$  и  $R(\text{Median}, \sigma)=0,8$ .

Поэтому, для того чтобы исключить влияние погодных условий при анализе динамики LST за 1989-2022 гг., была применена процедура стандартизации

Тенденция к увеличению значения  $\sigma$  на участке 1 (гидросистемы Кокоря) на рисунке б), в отличие от рисунка а) хорошо объясняется появлением на нем в последние годы островов растительности на участках, где прежде была голая почва. Это также подтверждается динамикой нормализованного индекса растительности NDVI.

Исследована связь температуры поверхности LST и индексами влажности NDMI, NDWI и индексом растительности NDVI

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}; NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}; NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$



Картограммы распределения а) LST и индексов б) NDVI, в) NDMI г) NDWI на территории Чуйской котловины на 29.08.2019

## Корреляционный анализ

	LST	NDVI	NDMI	NDWI
LST	1			
NDVI	-0.75	1		
NDMI	-0,65	0,64	1	
NDWI	0,67	-0,97	-0,59	1

Как видим, все коэффициенты корреляции значимы, очень высокий коэффициент корреляции (-0.97), т.е. прямая обратная зависимость, присутствует между NDVI и NDWI, что можно объяснить тем, что NDWI не позволяет выделить влагу в почве и растительности, он нацелен на выделение исключительно водных объектов, поэтому в дальнейшем мы приводим статистические оценки в основном для индексов NDMI и NDVI.



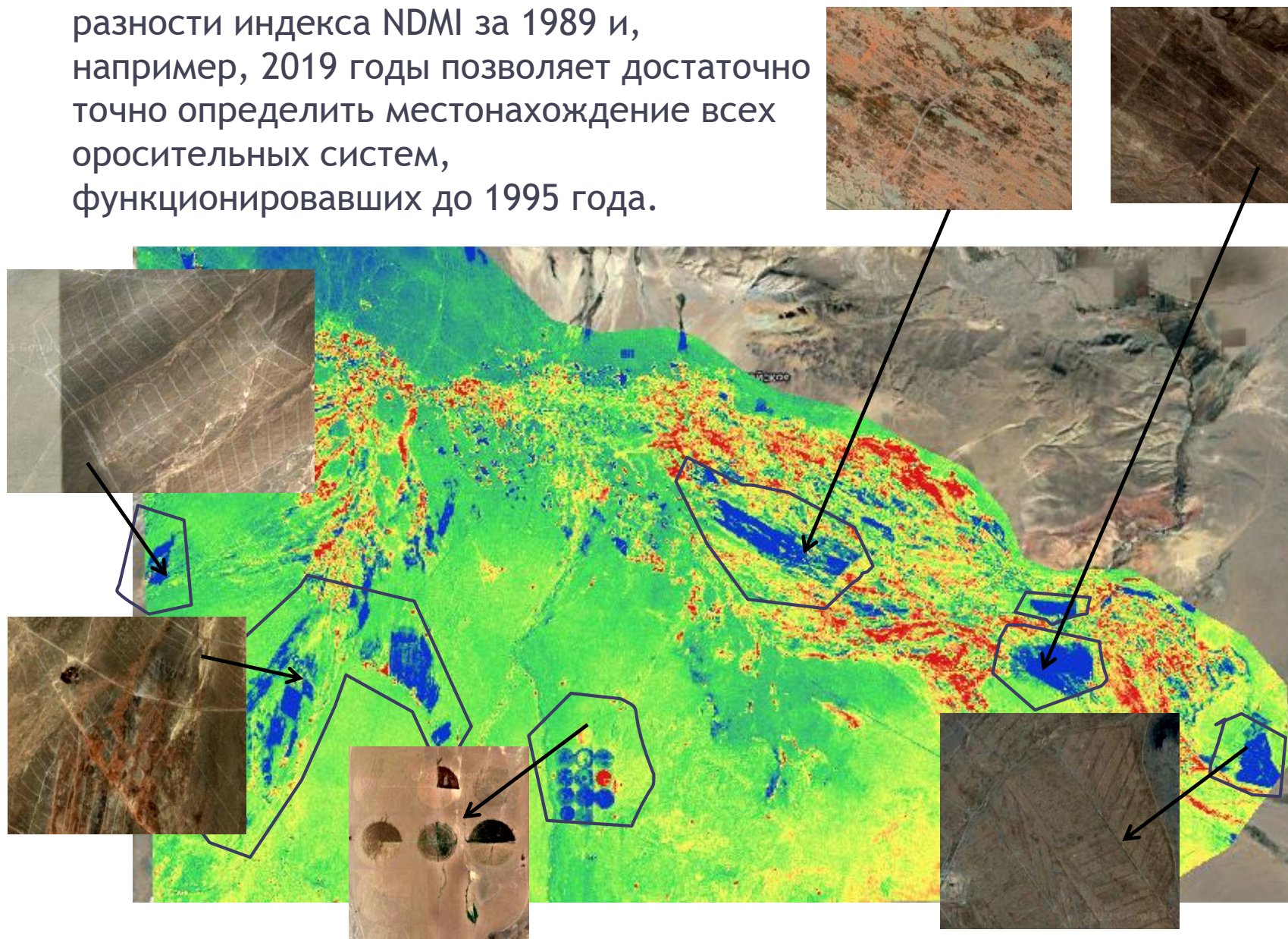
Корреляционный анализ на ключевых участках показал, что зависимость между LST и индексами NDMI и NDVI на ключевых участках может сильно отличаться, прослеживается схожий характер связи на староорошаемых участках. На тестовом участке корреляционные связи слабые или вообще отсутствуют. Получены уравнения регрессии вида  $y=ax+b$  и их коэффициенты также приведены в таблице

R(участок 1)	(NDVI,NDMI)	a	b	(LST,NDVI)	a	b	(LST,NDMI)	a	b
03.09.1989	0.94	0.74	-0.2	-0.84	-21.69	35.29	-0.87	-28.34	29.28
24.08.1994	0.95	0.73	-0.18	-0.83	-20.29	34.45	-0.85	-26.76	29.27
04.09.1998	0.85	0.6	-0.17	-0.72	-13.13	28.53	-0.79	-20.71	24.69
04.09.2001	0.66	0.37	-0.15	-0.62	-18.23	33.09	-0.73	-38.15	26.31
17.08.2009	0.82	0.59	-0.17	-0.5	-13.24	30.82	-0.5	-18.45	27.26
31.08.2014	0.84	0.51	-0.18	-0.73	-18.74	39.59	-0.72	-30.28	33.44
29.08.2019	0.84	0.52	-0.16	-0.7	-17.62	37.87	-0.67	-26.64	32.13
21.08.2022	0.92	0.61	-0.21	-0.78	-12.57	26.26	-0.82	-19.78	21.87
R(участок 2)	(NDVI,NDMI)	a	b	(LST,NDVI)	a	b	(LST,NDMI)	a	b
03.09.1989	0.94	0.79	-0.25	-0.82	-26.43	38.79	-0.87	-33.45	30.37
24.08.1994	0.94	0.84	-0.26	-0.81	-25.43	39.96	-0.86	-30.27	32
04.09.1998	0.78	0.69	-0.25	-0.58	-18.05	30.77	-0.7	-24.46	24.51
04.09.2001	0.91	0.79	-0.26	-0.71	-21.15	35.18	-0.86	-29.28	27.89
17.08.2009	0.96	0.88	-0.25	-0.79	-20.49	30.8	-0.83	-23.46	25.02
31.08.2014	0.94	0.7	-0.25	-0.77	-18.59	40.72	-0.87	-27.96	33.96
29.08.2019	0.9	0.64	-0.23	-0.52	-9.74	37.32	-0.7	-18.42	33.73
21.08.2022	0.96	0.86	-0.29	-0.73	-11.89	27.25	-0.8	-14.54	23.08

R(участок 3)	(NDVI,NDMI)	a	b	(LST,NDVI)	a	b	(LST,NDMI)	a	b
03.09.1989	0.89	0.75	-0.28	-0.84	-24.9	36.9	-0.86	-30.21	27.78
24.08.1994	0.89	0.74	-0.27	-0.87	-26.8	39	-0.85	-31.8	29.5
04.09.1998	0.83	0.61	-0.26	-0.76	-19.05	34.68	-0.79	-26.67	26.99
04.09.2001	0.73	0.46	0.23	-0.64	-14.4	32.95	-0.68	-23.94	26.49
17.08.2009	0.82	0.57	-0.23	-0.64	-15.93	33.77	-0.73	-25.9	27.53
31.08.2014	0.66	0.41	-0.23	-0.66	-15.47	39.75	-0.74	-27.49	32.75
29.08.2019	0.78	0.51	-0.23	-0.68	-13.48	37.34	-0.74	-21.81	31.63
21.08.2022	0.55	0.35	-0.22	-0.46	-10.56	39.4	-0.68	-24.28	33.7
R(участок 4)	(NDVI,NDMI)	a	b	(LST,NDVI)	a	b	(LST,NDMI)	a	b
03.09.1989	0.43	0.33	-0.25	-0.31	-16.4	37.94	-0.41	-27.39	30.03
24.08.1994	0.48	0.38	-0.23	-0.02	-1.01	36.48	-0.12	-7.48	35.03
04.09.1998	0.49	0.39	-0.24	-0.26	-10.79	35.09	-0.38	-19.21	29.89
04.09.2001	0.55	0.35	-0.24	0.024	1.05	32.02	-0.14	-9.76	30.38
17.08.2009	0.57	0.42	-0.23	-0.34	-12.46	32.82	-0.41	-20.56	27.48
31.08.2014	0.38	0.3	-0.21	-0.16	-10.2	39.45	-0.55	-45.79	30.04
29.08.2019	0.35	0.17	-0.16	0.19	-10.16	32.72	-0.33	-36.41	31.22
21.08.2022	0.15	0.11	-0.19	0.23	14.76	23.94	-0.48	-41.97	19.84

Как видим из таблицы, значения пространственной корреляции индексов NDMI, NDVI для участков 1 -3 достаточно высокие, значительно выше, чем в целом по Чуйской котловине. Самые высокие коэффициенты корреляции, как между индексами NDMI и NDVI, так и с температурой LST приходятся на 1989 и 1994 годы, когда оросительные системы еще работали в полную мощность. Видим, что зависимость между индексами NDMI и NDVI во всех случаях прямая ( $R > 0$ ).

Кроме того, пространственный анализ разности индекса NDMI за 1989 и, например, 2019 годы позволяет достаточно точно определить местонахождение всех оросительных систем, функционировавших до 1995 года.



# Выводы

- Предложена модификация алгоритма вычисления LST, результаты экспериментального исследования показали, что предложенный алгоритм в большинстве случаев показывает наилучшую точность при валидации на основе наземных данных. Наземные данные получены с использованием автоматизированных регистраторов температуры DS-1921 “Thermochron” в период с 17.07.2022 по 27.10.2022.
- Построены картосхемы и исследована динамика распределения LST на территорию Чуйской котловины с 1998 по 2022 гг. на основе 8 разновременных снимков, посчитаны основные статистические показатели, построены графики их динамики.
- Выявлена зависимость пространственного распределения LST и индексов влажности и растительности (NDMI, NDWI, NDVI), получены количественные оценки, показано наличие значимой корреляции между LST и индексами по пространству и времени.
- Показано, что функционирование оросительных систем приводит к существенному изменению характера распределения значений LST как на территории Чуйской котловины в целом, так и на ключевых участках, кроме тех, которые расположены вне зоны орошения.
- Таким образом, представленная в работе методика исследования распределения температур может быть использована для исследования температурных режимов обширных труднодоступных территорий.

Спасибо за внимание!

