

Алгоритм применения материалов спутниковых съёмок для выбора перспективных участков при интродукции теплолюбивых сельскохозяйственных культур (на примере Новгородской области)

В. И. Горный¹, О. В. Балун¹, А. В. Киселев¹,
И. А. Смирнов², А. А. Тронин¹, Е. П. Шкодина¹

¹ Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН
Санкт-Петербург, 199178, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

² Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого
Великий Новгород, 173003, Россия

Наблюдающееся потепление климата обосновало актуальность интродукции теплолюбивых высокоурожайных сельскохозяйственных культур в Нечернозёмной зоне России. Вместе с тем не все территории Нечернозёмной зоны достигли сумм активной температуры, необходимых для выращивания теплолюбивых интродуцентов. Поэтому целью настоящего исследования стала разработка алгоритма применения материалов спутниковых съёмок при выборе земель с повышенной теплообеспеченностью как первого этапа технологии для интродукции теплолюбивых сельхозкультур в Нечернозёмной зоне. Известно, что теплообеспеченность почв зависит от метеорологических условий, агрофизических характеристик почв, от уровня инсоляции различных форм рельефа дневной поверхности, наличия эндогенного подогрева. Поэтому встаёт вопрос о выявлении наиболее теплообеспеченных земель сельскохозяйственного назначения для экономически эффективного возделывания теплолюбивых интродуцентов. Для решения этой проблемы в качестве объекта исследований выбрана Новгородская область, где Новгородским научно-исследовательским институтом сельского хозяйства с 2016 г. проводятся агроэкологические испытания теплолюбивых сорговых культур. Данные многолетних исследований легли в основу построения прогнозных карт потенциальной урожайности сорговых культур на землях сельскохозяйственного назначения и подбора перспективных для интродукции участков. При построении прогнозных карт использована большая база цифровых материалов ежедневной тепловой космической съёмки, полученных в тёплые сезоны года на территории Новгородской области за последние 20 лет. Дано обоснование алгоритма построения карт прогноза урожайности сорговых культур в условиях Новгородской области. Выполнен анализ пространственно-временной изменчивости теплообеспеченности на землях сельскохозяйственного назначения Новгородской области. Показано, что к 2030 г. следует ожидать рост теплообеспеченности земель, а соответственно, и урожайности сорговых культур. Сделан вывод о том, что разработанная технология может быть применена и для других теплолюбивых культур сельхозназначения.

Ключевые слова: потепление климата, почвы, теплолюбивые агрокультуры, интродукция, сорговые, Новгородская область, агроэкологические исследования, тепловая космическая съёмка, алгоритм, урожайность, прогноз

Одобрена к печати: 21.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-64-80

Введение

В Нечернозёмной зоне России глобальное потепление приводит к повышению теплообеспеченности сельскохозяйственных земель (Gornyy et al., 2023b). В результате за последние десятилетия в Новгородской области возросли суммы активной (превышающей +10 °С) среднесуточной температуры воздуха в диапазоне 1940–2660 °С, характеризующей теплообеспеченность почв, что проявилось в увеличении продолжительности периода вегетации. Поэтому актуальной проблемой для экономики сельского хозяйства Нечернозёмной зоны стало изучение возможности интродукции на её территории теплолюбивых сельскохозяйственных культур.

ственных культур, характеризующихся большей урожайностью и устойчивостью к засухам. Перспективными для интродукции кормовыми культурами, привлекающими внимание специалистов, в последние годы в Западной Европе (Sauer et al., 2024; Schaffasz et al., 2019; <https://wissen.julius-kuehn.de/klimaschutz/en/projects/increasing-carbon-sink-potentials/sorghum>; <https://www.southeastfarmer.net/arable/growing-sorghum-a-climate-smart-option>) и в различных регионах России (Артемов, Таракин, 2016; Гулидова, Гусева, 2020; Кузьминов, Володин, 2018; Муслимов и др., 2019; Ториков и др., 2018) являются сорговые культуры. К трибе сорговых также относится кукуруза, близкая по биологическим особенностям, но более требовательная к условиям произрастания и менее урожайная в одних и тех же условиях. Для выращивания сорговых культур необходима сумма активной температуры (САТ) воздуха в интервале 2500–3000 °С за вегетационный период. Нижняя граница САТ воздуха (2500 °С) уже достигнута верхним пределом диапазона САТ воздуха в Новгородской области (2660 °С). Поэтому в 2016 г. Новгородским научно-исследовательским институтом сельского хозяйства (НИИСХ) (в настоящее время входит в Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН) по договору со Ставропольским НИИСХ (ныне Северо-Кавказским федеральным научным аграрным центром) впервые на территории Новгородской области были посеяны семена сорговых культур: суданской травы линии Землячка, сорго-суданкового гибрида Навигатор, многолетнего сорго Караван. В условиях Новгородской области урожайность зелёной массы суданской травы Землячка и сорго-суданкового гибрида Навигатор в фазу вымётывания составила 58 и 68 т/га соответственно. Для сравнения, урожайность традиционных для Новгородской области однолетних кормовых культур — вико-овсяных и горохо-овсяных смесей — составляет 15–25 т/га. Опыты с посевами многолетнего сорго Караван показали, что растения не выдерживают суровых условий зимы. Поэтому выращивание многолетнего сорго в климатических условиях Новгородской области пока не имеет практического смысла. В ближайшей перспективе целесообразно разводить сорговые культуры на кормовые цели. Кроме того, выяснилась сильная зависимость урожайности от теплообеспеченности в первую половину вегетации растений (май — июнь) (Балун, Шкодина, 2024; Шкодина, Балун, 2023), которая показала, что повышение САТ за период май — июнь на 100 °С приводит к увеличению урожайности на 12 т/га. Таким образом, в результате многолетних исследований была выявлена устойчивая положительная зависимость урожайности сорговых от САТ воздуха.

В последнее время в Германии начаты исследования по выбору территорий с микроклиматическими условиями, более благоприятными для интродукции сорговых (Найджароог et al., 2023, 2024). Для этого были использованы цифровые карты, построенные по результатам реанализа климатических данных по сети 5×5 км. Реанализ опирается на результаты наблюдений на редкой и неравномерной сети метеостанций и на материалы регулярных спутниковых съёмок. С помощью математических моделей восстанавливается равномерное покрытие территорий агрометеорологическими характеристиками. В настоящее время возможности математических моделей не позволяют строить карты более детальные, чем по сети 5×5 км. Перспективы применения результатов реанализа в Новгородской области ограничиваются малыми пространственными размерами земель сельскохозяйственного назначения, для которых сетка 5×5 км является слишком грубой. В то же время материалы многолетних тепловых космических съёмок с пространственным разрешением 1×1 км позволяют выявить неоднородность тепловой реакции подстилающей поверхности (ПП) на потепление климата как в целом на территории Северной Евразии, так и в пределах Новгородской области (Горный и др., 2021). Поэтому было предложено использовать результаты многолетних тепловых космических съёмок для решения проблемы выбора теплообеспеченных земель для интродукции сорговых в Новгородской области.

Непосредственное применение тепловой космической съёмки оказалось невозможным, так как результаты проведённых в период с 2016 по 2024 г. исследований сорговых культур базировались на сопоставлении урожайности с температурой воздуха, измеренной на высоте 2 м над поверхностью почвы. Тепловая же космическая съёмка картирует температуру ПП. При этом известно, что температура приземного воздуха формируется под влиянием, в том

числе, и температуры ПП. В свою очередь температура почвы формируется под действием энергетического баланса ПП, зависящего от поглощённой энергии солнечной радиации, определяемого альбедо поверхности, углом и азимутом склонов, теплофизическими свойствами почвы, теплообменом с атмосферой, испарением влаги (Матвеев, 1984; Чудновский, 1976) и эндогенными источниками тепла (Горный и др., 1993, 2009, 2016; Gornyy et al., 2023a). Поэтому для разработки дистанционной технологии выбора наиболее теплообеспеченных земель необходимо показать, что САТ ПП могут быть использованы для прогнозирования урожайности сорговых культур в условиях Новгородской области. Далее необходимо найти зависимости САТ ПП, закартированной тепловой космической съёмкой, с данными по урожайности сорговых культур. Опираясь на полученные статистические модели, станет возможным строить карты потенциальной, усреднённой за период исследований, урожайности однолетних сорговых культур.

Цель настоящего исследования — разработка по результатам многолетних тепловых космических съёмок и опытных данных алгоритма выбора теплообеспеченных участков как первого этапа технологии интродукции сорговых культур.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана территория Новгородской области. Северная часть области относится к подзоне южной тайги, а южная — хвойно-широколиственных лесов (Андреева и др., 2009). Исследования проводились на опытных полях Новгородского НИИСХ. Почвы участка дерново-подзолистые, легкосуглинистые, слабоводопроницаемые с плотностью пахотного горизонта 1,17–1,28 г/см³, плотностью твёрдой фазы 2,58–2,89 г/см³, полной влагоёмкостью 34–35 %, наименьшей влагоёмкостью 29–30 %, пористостью 57–62 %, среднекультуренные, близкие к нейтральным (рН_{KCL} = 5,9), содержание гумуса 3,19 %, обеспеченность фосфором очень высокая (Р₂O₅ = 429 мг/кг почвы), подвижным калием — повышенная (K₂O = 165 мг/кг почвы).

Результаты экологических испытаний сорговых интродуцентов, явившиеся научной основой для разработки методики, приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Агрометеорологические условия и урожайность зелёной массы сорговых культур

Метеопараметр	Годы								
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
<i>Метеоусловия по данным метеостанции Великий Новгород</i>									
Сумма активной температуры воздуха (май – июнь), °С	914	562	905	884	793	922	746	799	905
Сумма активной температуры воздуха (май – август), °С	2017	1579	2076	1851	1820	2097	1939	1920	2071
<i>Температура подстилающей поверхности по спутниковым данным</i>									
Сумма активной температуры подстилающей поверхности (май – июнь), °С	699	536	677	826	700	811	608	642	824
Сумма активной температуры подстилающей поверхности (май – август), °С	1647	1339	1690	1619	1512	1788	1633	1639	1836
<i>Урожайность, т/га</i>									
Суданская трава линия Землячка	59	18	89	52	41	47	18	33	86
Сорго-суданковый гибрид Навигатор	87	24	76	56	70	51	22	20	80
Сорго сахарное Силосное-88 (гибрид)	—	21	71	58	110	103	27	22	99
Сорго сахарное сорт Галия				100	79	54			119
Среднее по году по всем сортам	73		77	67	75	64	24	24	96

При исследовании использованы материалы спутниковых съёмок, полученных спектро-радиометрами MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленными на спутниках Aqua и Terra. Температурная чувствительность инфракрасных датчиков MODIS составляет 0,05–0,07 К, пространственное разрешение — 1×1 км. В качестве исходных данных использованы стандартные продукты MOD11A1 (Wan et al., 2021a) и MYD11A1 (Wan et al., 2021b). Съёмка спутниками Aqua и Terra проводилась по два раза в сутки каждым спутником. Всего обработано более 32 000 сцен с общим объёмом информации порядка 90 ГБ. Сумма активной температуры рассчитывалась как среднее значение между этими четырьмя измерениями. Дни с наблюдениями, пропущенными вследствие облачности, заполнялись значениями, полученными путём простой линейной интерполяции ближайших по времени измерений.

Температура воздуха на высоте 2 м была взята с сервиса RP5 («Расписание погоды», <https://rp5.ru/>) (метеостанция 26179 — Великий Новгород, расположена на расстоянии 17 км от опытных полей, координаты: 58,517° с. ш. и 31,250° в. д., высота над уровнем моря 24 м).

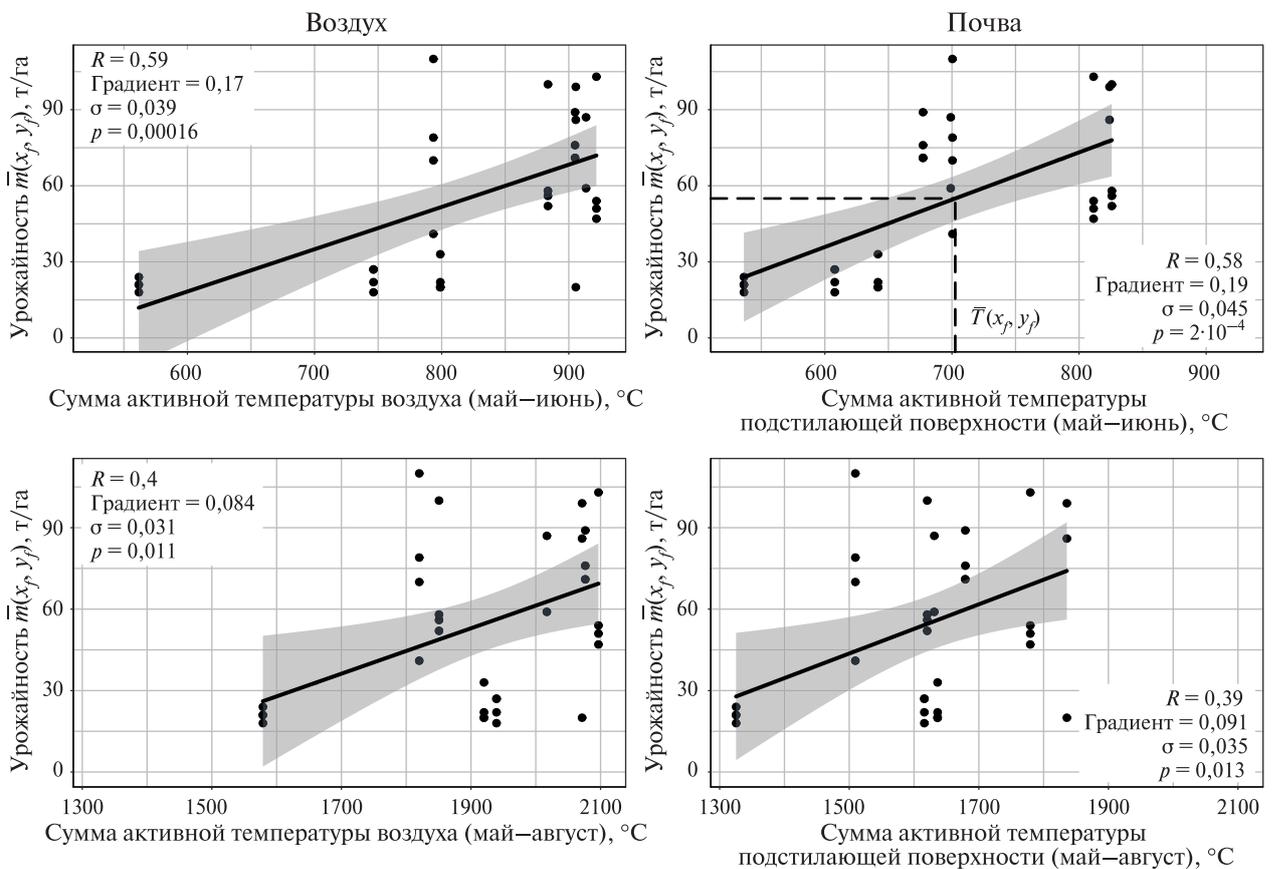


Рис. 1. Регрессионные зависимости относительной урожайности на опытных полях от: САТ воздуха и САТ ПП опытных полей по данным спутниковых съёмок. Для весеннего периода (май – июнь) среднее значение относительной урожайности за весь период опытных выращиваний, равное 55 т/га, принято при значении $\bar{T}(x_f, y_f) = 700^\circ\text{C}$

Для построения регрессий, характеризующих связи урожайности и температуры ПП за май – июнь и за май – август каждого года в период 2016–2024 гг., по материалам тепловой космической съёмки определялась температура поверхности полей Новгородского НИИСХ, где проводились экологические испытания сорговых культур (*табл. 1*). Результаты сравнивались с построенными ранее регрессиями зависимости урожайности от САТ воздуха (*рис. 1*).

Для определения скорости изменения (линейных трендов) САТ воздуха и ПП с помощью метода наименьших квадратов рассчитывались коэффициенты линейной регрессии по времени

(скорость изменения показателя во времени) и характеристики статистической значимости этой регрессии: p -значение — вероятность получить данный коэффициент регрессии при условии отсутствия тренда (нуль-гипотеза), которая рассчитывается с помощью теста Вальда в предположении, что проверяемая статистика подчиняется распределению Стьюдента; σ — среднеквадратическое отклонение результатов от линии регрессии.

Результаты

Основные соотношения

При разработке алгоритма построения прогнозных карт урожайности, необходимого для выбора наиболее теплообеспеченных земель Новгородской области, были приняты следующие обозначения физических величин (табл. 2).

Таблица 2. Основные физические величины, определения и обозначения

№ п/п	Обозначения величин	Наименования, единицы измерения
1	$x = 1...X; y = 1...Y$	Координаты (номера рядов и столбцов) на цифровой карте
2	x_o, y_o	Координаты метеостанции
	x_f, y_f	Координаты опытных полей
3	$n = 1...N$	Порядковый номер года с начала опытного выращивания
4	$r = 1...R$	Порядковый номер дня в сезоне года при суммировании активной температуры
5	$l = 1...4$	Порядковый номер спутниковой съёмки в течение данных суток
6	$t(x_o, y_o, r, n)$	Среднесуточная температура воздуха на метеостанции, °С
7	$t(x, y, l, r, n)$	Температура ПП на площадке (x, y) в момент l -й спутниковой съёмки в r -е сутки, °С
8	$t(x, y, r, n) = \sum_{l=1}^4 t(x, y, l, r, n)$	Среднесуточная температура ПП в r -е сутки n -го года на площадке (x, y) , °С
9	$T(x_o, y_o, n) = \sum_{r=1}^{r=R} t(x_o, y_o, r, n)$	САТ воздуха на метеостанции за выбранный интервал времени n -го года, °С
10	$T(x_f, y_f, n) = \sum_{r=1}^{r=R} t(x_f, y_f, r, n)$	САТ ПП опытных полей за выбранный интервал времени n -го года, °С
11	$T(x, y, n) = \sum_{r=1}^{r=R} t(x, y, r, n)$	САТ ПП за выбранный интервал времени n -го года, °С
12	$\bar{T}(x_f, y_f)$	САТ ПП на опытных полях, в среднем за май – июнь в 2016–2024 гг., °С
13	$\bar{T}(x, y)$	САТ ПП остальных сельскохозяйственных земель, в среднем за май – июнь 2016–2024 гг., °С
14	$m(x_f, y_f, n)$	Урожайность интродуцентов на опытных полях в n -м году, т/га
15	$m(x, y, n)$	Урожайность интродуцентов на площадке (x, y) в n -м году, т/га
16	$\bar{m}(x_f, y_f)$	Потенциальная (средняя за период исследований) урожайность интродуцентов на опытных полях (x_f, y_f) , т/га
17	$\bar{m}(x, y)$	Потенциальная (средняя за период исследований) урожайность интродуцентов на площадке (x, y) , т/га

Обычно урожайность культур прогнозируют на основе статистических данных о температуре воздуха, измеренной на высоте 2 м над поверхностью почвы. Принципиальным момен-

том использования материалов тепловой космической съёмки для выбора участков с повышенной теплообеспеченностью является обоснование применимости температуры ПП вместо температуры воздуха.

Для ответа на этот вопрос проведено сравнение (рис. 2а) САТ ПП в районе расположения метеостанции с измеренной на ней САТ воздуха:

$$T(x_f, y_f, n) = A \cdot T(x_o, y_o, n) + B.$$

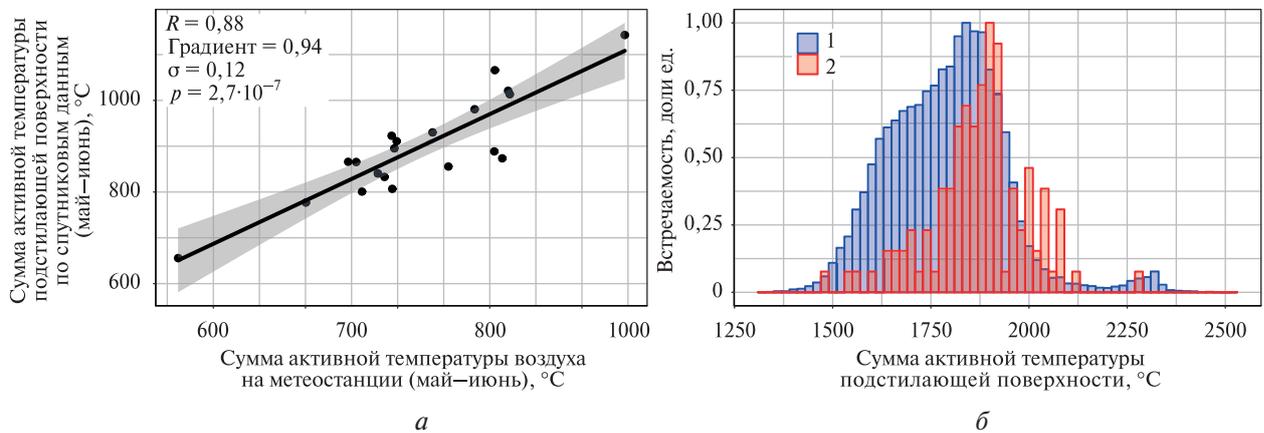


Рис. 2. Распределения сумм активной температуры: а — сопоставление САТ воздуха по данным метеостанции Великий Новгород с САТ ПП на опытных полях; б — гистограммы нормированной на максимум встречаемости САТ ПП. 1 — вся территория Новгородской области, 2 — территории, занятые дубравами

Анализ соотношений температуры воздуха на метеостанции с температурой ПП на опытных полях (см. рис. 2а) показал очень высокую статистически значимую корреляцию (коэффициент корреляции $R = 0,88$, градиент $0,94$, p -значение равно $2,7 \cdot 10^{-7}$). Это дало надежду для получения положительного результата при использовании материалов тепловой космической съёмки для выбора участков интродукции теплолюбивых сельскохозяйственных культур.

Обнаружение участков с необходимой для сорговых культур САТ ПП не является окончательным доказательством. Для доказательства требуется обнаружение природных явлений, характеризующих повышенную теплообеспеченность, например, таких как опережающее снеготаяние (Gornyy et al., 2023a) или наличие аazonальной (теплолюбивой) дикорастущей растительности (Горный, Теплякова, 2001; Горный и др., 2009). Как отмечалось выше, Новгородская область относится к подзоне южной тайги, в пределах которой более теплолюбивые широколиственные виды деревьев занимают подчинённое положение. То есть широколиственные деревья после завершения ледникового периода смогли выжить и заняли в основном наиболее теплообеспеченные участки. Развитые в отдельных районах Новгородской области дубравы (см. 2 и 3 на рис. 3, см. с. 70) являются аazonальным видом. Всего в области произрастает около 3,5 тыс. га лесов с преобладанием дуба черешчатого и других широколиственных древесных пород. Используя участки распространения дубрав (см. рис. 3), были построены и сопоставлены гистограммы САТ ПП всей территории Новгородской области (см. 1 на рис. 2б) и мест распространения современных и исторических дубрав (см. 2 на рис. 2б).

Анализ соотношения распределения САТ ПП (см. рис. 2б) показывает, что гистограмма САТ ПП участков распространения дубрав сдвинута в сторону более высоких значений САТ ПП. Это указывает на то, что повышенная САТ ПП выступает характеристикой теплообеспеченности земель и может быть использована при интродукции теплолюбивых агрокультур.

Далее определялись коэффициенты уравнения линейной регрессии между САТ ПП и урожайностью на опытных полях (см. рис. 1):

$$m(x_f, y_f, n) = C \cdot T(x_o, y_o, n) + D, \quad (1)$$

где C и D — постоянные коэффициенты.

Из предположения, что на остальных землях сельскохозяйственного назначения почвенные и агрометеорологические условия близкие, что соответствует условию постоянства коэффициентов C и D в соотношении (1), находились коэффициенты уравнения регрессии для каждой из элементарных площадок сельскохозяйственных земель Новгородской области с координатами цифровой карты (x, y) :

$$m(x, y, n) = C \cdot T(x, y, n) + D. \quad (2)$$

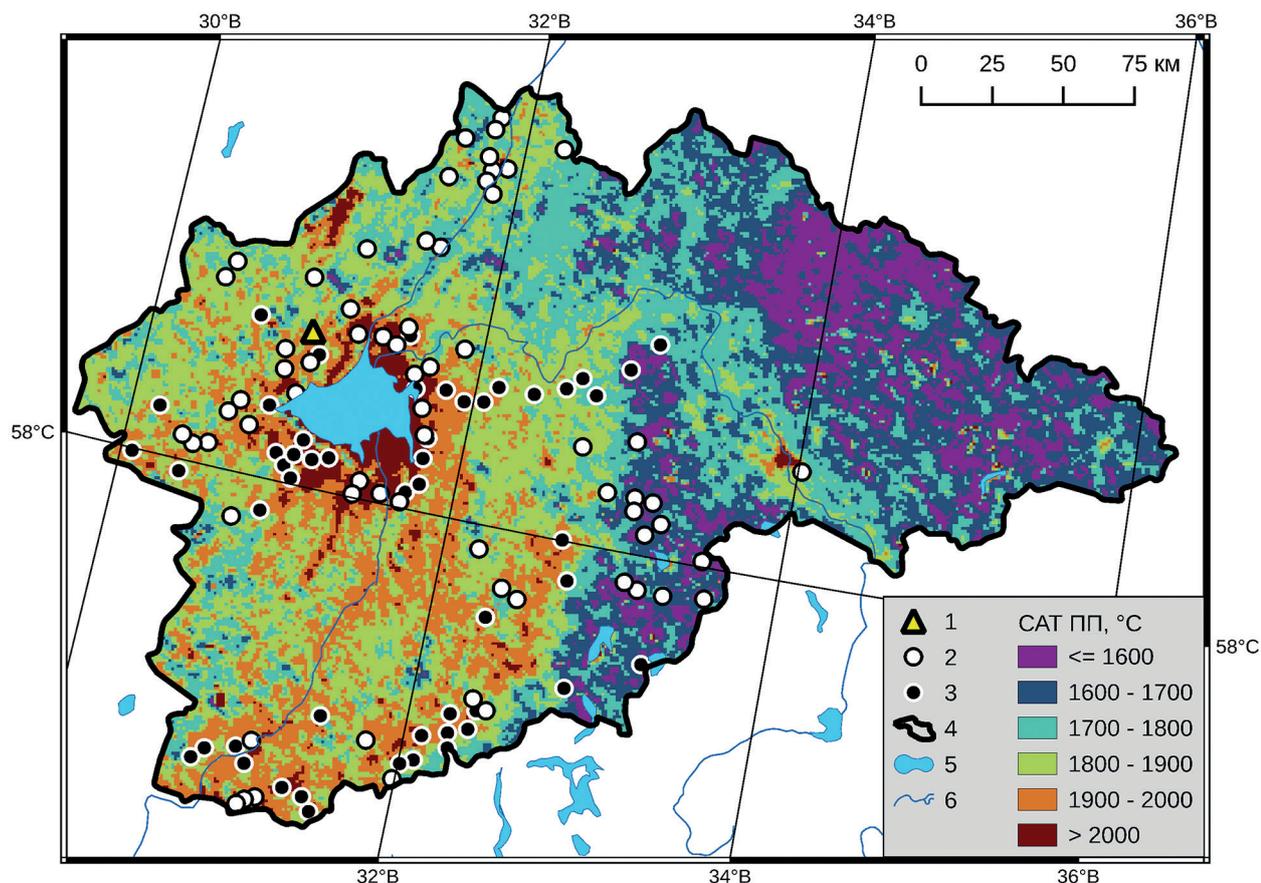


Рис. 3. Цифровая карта Новгородской области: средние за 2002–2024 гг. САТ ПП (по результатам тепловой космической съёмки спутниками Terra/Aqua (MODIS)). 1 — опытные поля Новгородского НИИСХ, 2 — современное распространение дубрав, 3 — дубравы, вырубленные в XVIII в. (Смирнов, 2022), 4 — граница Новгородской области, 5 — озёра, 6 — реки

Следует отметить, что принятое допущение об однородности плодородия почв на всей территории области позволяет получить данные об урожайности только в самом первом приближении. Но это даёт возможность сделать выбор перспективных участков, в пределах которых в дальнейшем целесообразно провести агроэкологические исследования с выбранными культурами для получения окончательного доказательства правильности их выбора.

Анализ показал, что в мае–июне линейные тренды зависимости урожайности от САТ ПП характеризуются достаточно высокими коэффициентами регрессии и статистически значимыми p -показателями. Это указывает на достоверность определения линейного тренда САТ ПП в период май–июнь. Градиент линии тренда САТ ПП равен 0,19 (см. рис. 1), что несколько выше, чем значение градиента САТ воздуха по данным метеостанции (0,17) (см.

рис. 1). Отсюда следует более высокая чувствительность урожайности к температуре ПП, чем к температуре воздуха. Поэтому прогнозные карты урожайности теплолюбивых интродуцентов, построенные на основе анализа САТ ПП, должны характеризоваться не только большей детальностью, но и достоверностью по сравнению с картами, созданными с использованием САТ воздуха. За период май – август углы наклонов линейных регрессий оказались малыми как для САТ воздуха, так и для САТ ПП (см. рис. 1). На основании проведённого анализа сделан вывод, что сорговые культуры, выращиваемые в природно-климатических условиях Новгородской области, особенно чувствительны к теплообеспеченности почв в период май – июнь. Поэтому в дальнейшем строились и анализировались ежегодные цифровые карты САТ ПП и их многолетние тренды, полученные только для периода май – июнь. Анализ построенных цифровых карт показал как пространственную (рис. 4а–в) изменчивость, так и закономерное многолетнее повышение САТ ПП за последние 20 лет (см. рис. 4г).

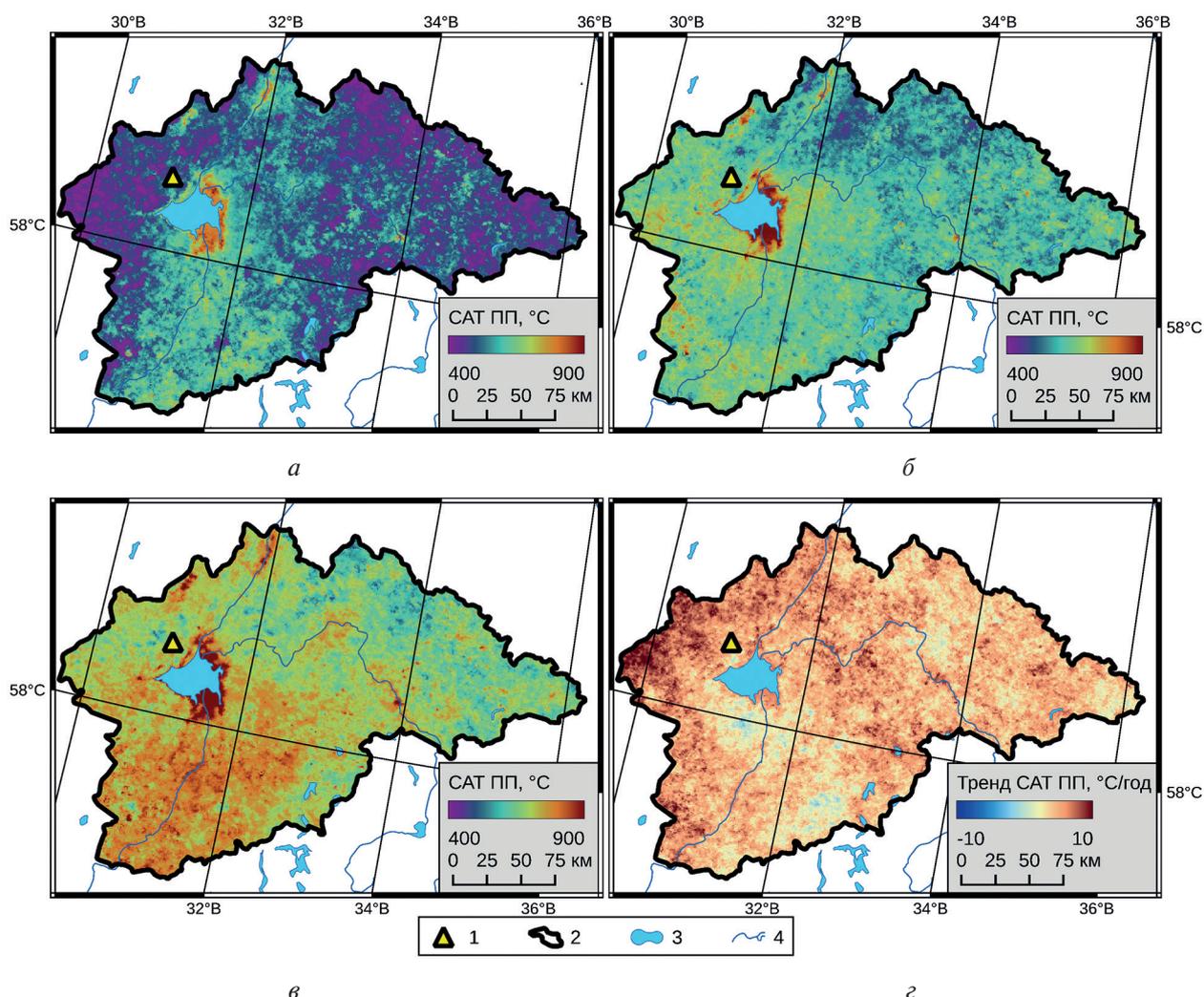


Рис. 4. Цифровые карты Новгородской области. САТ ПП, подготовленные для периода май – июнь: а – в 2004 г.; б – в 2012 г.; в – в 2018 г. Линейный тренд САТ ПП в мае – июне за весь период космических тепловых съёмки (2002–2024) (г). 1 – местоположение опытных полей, 2 – граница Новгородской области, 3 – озёра, 4 – реки

В настоящее время методы дистанционного зондирования рассматриваются в качестве инструментария информационной поддержки системы принятия управленческих решений, опирающейся на статистически усреднённую за многолетний период информацию. Поэтому для получения усреднённых (потенциальных) результатов, на основании которых возможна

разработка рекомендаций по выбору первоочередных мест для интродукции теплолюбивых культур, по материалам многолетней тепловой космической съёмки строилась карта средних за период исследований САТ ПП в мае – июне (рис. 5).

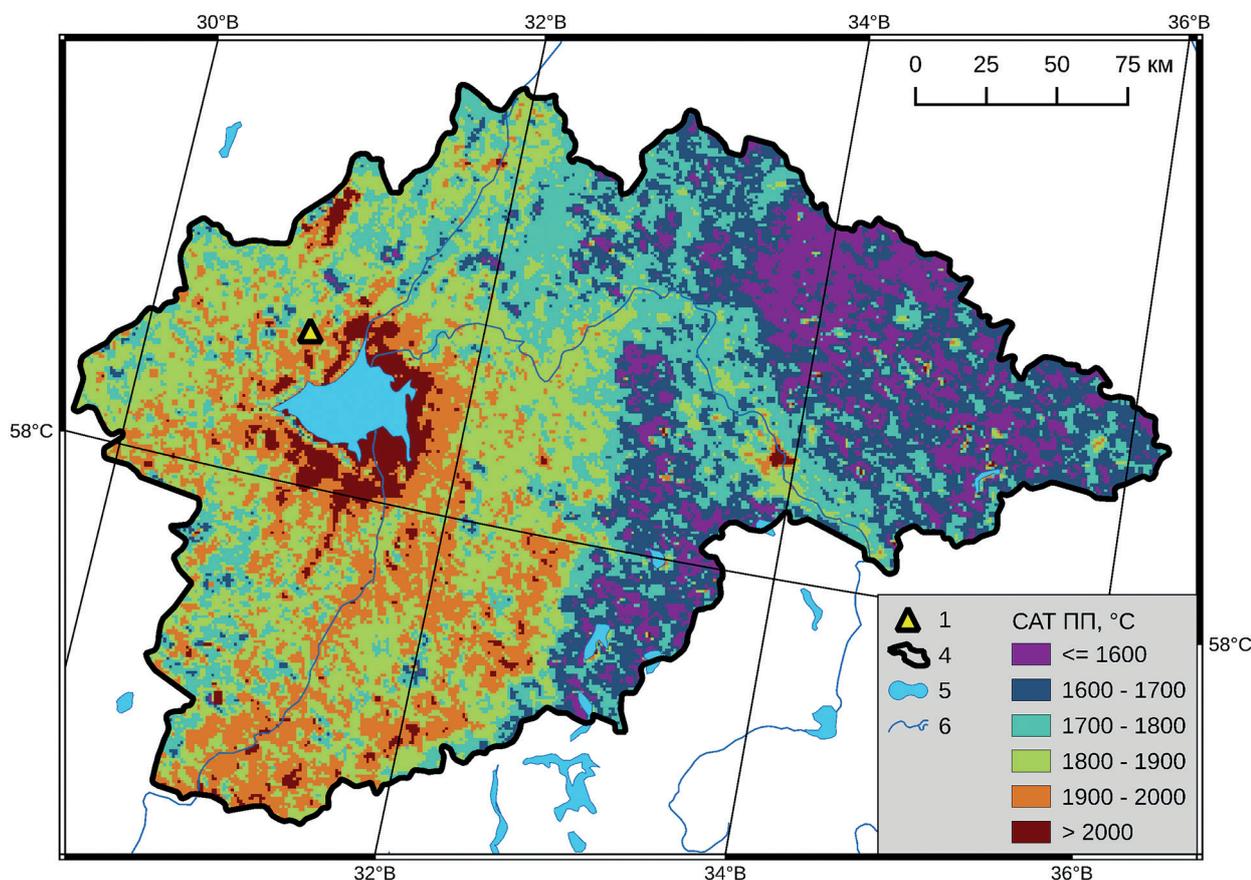


Рис. 5. Цифровая карта $\bar{T}(x, y)$ — средних за период исследований (2016–2024) значений САТ ПП за май – июнь в Новгородской области

При этом средние значения САТ ПП за вегетационные периоды за все годы испытаний (2016–2024) рассчитывались по формуле:

$$\bar{T}(x, y) = [T(x, y, n = 1) + T(x, y, n = N)] / 2. \quad (3)$$

В настоящее время наблюдается глобальный рост температуры. В результате экосистемы с различными тепловыми характеристиками реагируют на это потепление по-разному (Горный и др., 2021; Gornyy et al., 2023b). Этот момент необходимо учитывать при выборе площадей, перспективных для интродукции теплолюбивых сорговых культур. Поэтому для каждого пикселя цифровой карты находилась линейная зависимость $T(x, y, n)$ от времени, отражающая реакцию агроэкосистемы на потепление климата, и для каждой элементарной площадки (x, y) определялись значения скорости повышения САТ ПП (трендов) — $G(x, y)$ — коэффициентов в линейном уравнении (4), необходимых для многолетнего прогноза теплообеспеченности и урожайности:

$$T(x, y, n) = G(x, y) \cdot n + H(x, y). \quad (4)$$

Из предположения, что скорость потепления климата (нагрева ПП) $G(x, y)$ не изменится к 2030 г., подстановка в выражение (4) значения $n = N + 6$ позволяет рассчитать прогнозируемую в 2030 г. САТ ПП:

$$T(x, y, n) = G(x, y) \cdot (N + 6) + H(x, y).$$

Далее по аналогии с формулой (3) вычисляется САТ ПП в 2030 г. как среднее значение $T(x, y, n)$ в интервале времени $n = 3 - (N + 6)$:

$$\bar{T}(x, y, N + 6) = [T(x, y, n = 4) + T(x, y, n = N + 6)] / 2.$$

И по аналогии с уравнением (2) вычислялась потенциальная урожайность в 2030 г. (в среднем за годы исследований):

$$\bar{m}(x, y, N + 6) = C \cdot \bar{T}(x, y, N + 6) + D.$$

На основе вышеприведённых выкладок, опираясь на материалы многолетних тепловых космических съёмок и агроэкологических испытаний, предложен алгоритм построения цифровых карт потенциальной относительной урожайности теплолюбивых сорговых культур и прогноза этой урожайности на 2030 г. (рис. 6).

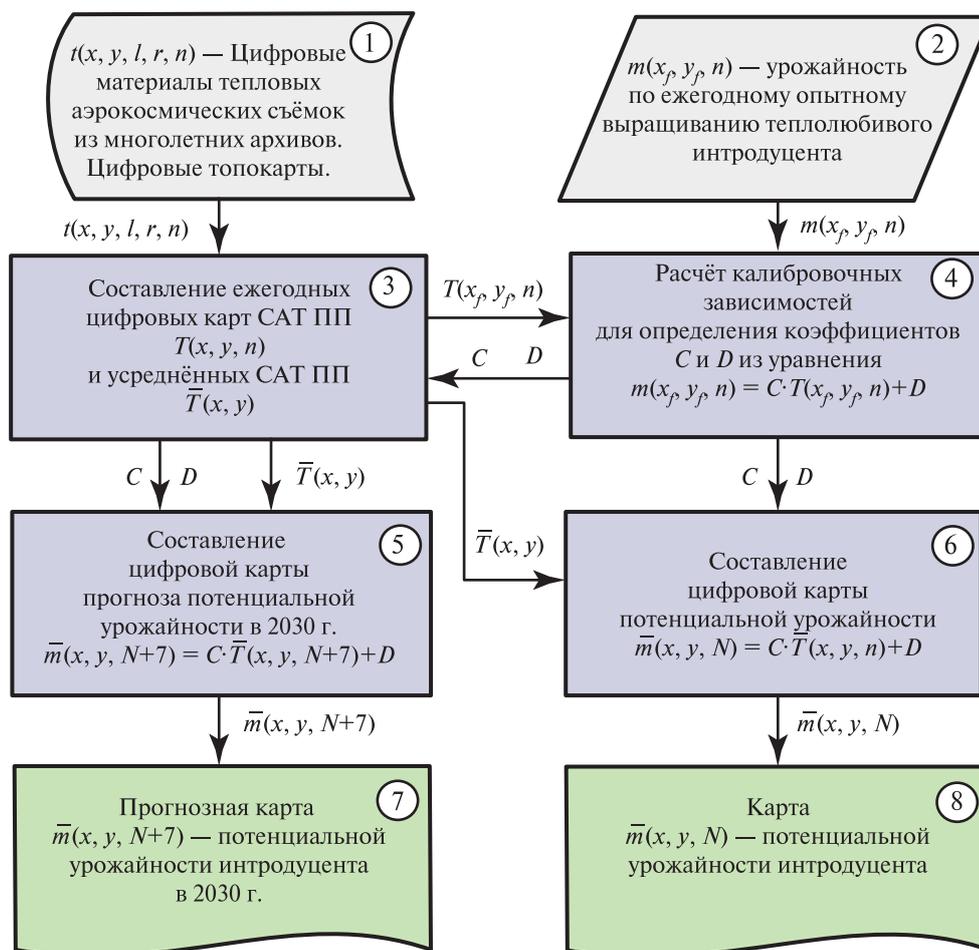
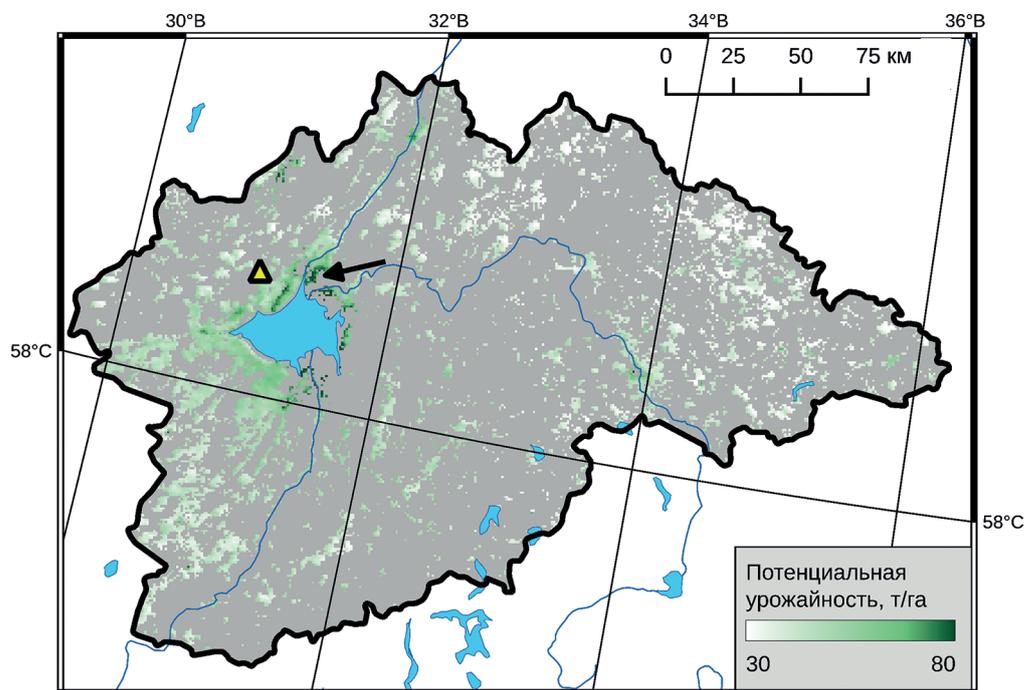


Рис. 6. Алгоритм построения цифровых карт потенциальной урожайности теплолюбивых интродуцентов по результатам многолетних тепловых космических съёмок и опытных выращиваний

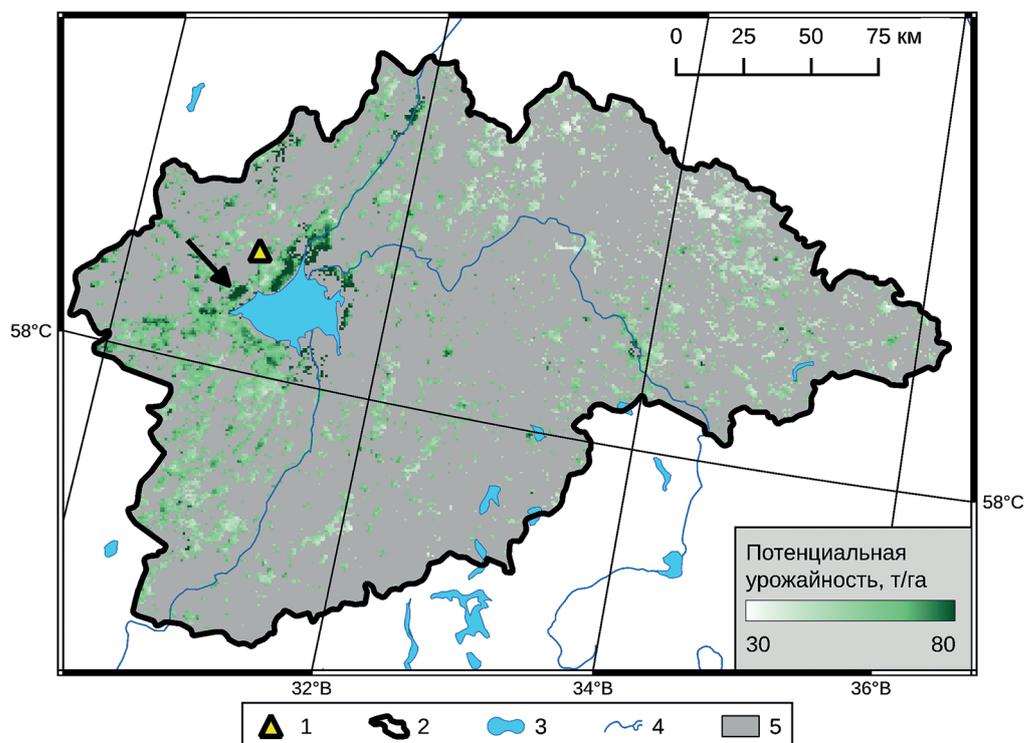
Карты потенциальной урожайности

Построение ежегодных карт САТ ПП для периода май – июнь показало, что распределение теплообеспеченности земель на территории Новгородской области неоднородно как в пространстве, так и во времени (см. рис. 4), что ещё раз подтвердило выдвинутую гипотезу о том, что для интродукции теплолюбивых сорговых культур целесообразно выявлять участки с повышенными значениями САТ ПП.

Результатом реализации алгоритма (см. рис. 6) явились цифровые карты потенциальной урожайности сорговых культур (рис. 7а) и прогноза потенциальной урожайности сорговых культур в 2030 г. (см. рис. 7б).



а



б

Рис. 7. Цифровые карты Новгородской области: а — потенциальная урожайность на период 2016–2024 гг.; б — прогноз потенциальной урожайности на 2030 г., учитывающий глобальное потепление. 1 — местоположение опытных полей, 2 — граница Новгородской области, 3 — озёра, 4 — реки, 5 — маска земель несельскохозяйственного назначения

Обсуждение результатов

Необходимо отметить, что разработанный алгоритм опирается на ограниченный объём данных и продолжительность эксперимента. Поэтому данный этап исследований следует рассматривать как предварительный, необходимый для выбора участков для последующей верификации алгоритма опытными выращиванием. Дальнейшее пополнение статистических данных позволит перейти к комплексному анализу зависимости урожайности как от САТ ТП, так и от количества осадков за вегетационный период.

Анализ теплообеспеченности земель сельскохозяйственного назначения Новгородской области показал, что земли с повышенными значениями САТ ПП расположены в прибрежной области Приильменской низменности (см. *рис. 7*). В зависимости от погодных условий уровень теплообеспеченности менялся от года к году, но в приозёрных районах во все годы отмечена более высокая, по сравнению с остальной территорией, теплообеспеченность (см. *рис. 4а–в*).

За последние два десятилетия в Новгородской области повсеместно наблюдалось увеличение САТ ПП (см. *рис. 4*). Наиболее интенсивно рост САТ ПП отмечен на самом западе и на востоке Новгородской области (см. *рис. 4г*), где ещё в 2004 г. были закартированы области пониженных САТ ПП (см. *рис. 4а*). Возможно, что это указывает на действие различных факторов, определяющих нагрев земель, лежащих в непосредственной близости к озеру Ильмень и на периферии Новгородской области. Можно предположить, что на западе и востоке Новгородской области определяющим выступает экзогенный фактор, т.е. потепление климата, а в районе озера Ильмень значимую роль в формировании температуры ПП могут играть постоянные эндогенные факторы, являющиеся аддитивными при потеплении климата: влияние разгрузки слаботермальных вод в Ильменской низменности (Горный и др., 2009, 2016; Gornyy et al., 2023a) либо экзотермические процессы в почве, признаки которых выявлены ранее на западном побережье озера Ильмень (Gornyy et al., 2023a), где, согласно подготовленным картам, прогнозируется высокая потенциальная урожайность сорговых культур (показано стрелкой на *рис. 7б*).

Ещё одним направлением развития данного исследования представляется анализ возможности применения материалов тепловых космических съёмок системами более высокого пространственного разрешения, например, таких как спутники серии Landsat, пространственное разрешение тепловых – инфракрасных каналов которых составляет 60–100 м, либо материалов детальной тепловой аэросъёмки, полученных с беспилотных летательных аппаратов. Высокая детальность тепловых карт позволит перейти на локальный уровень рекомендаций по интродукции теплолюбивых культур на участках с естественным геотермальным подогревом, обусловленных разгрузкой слаботермальных подземных вод по тектоническим нарушениям и зонам трещиноватости пород (Горный, 2007; Горный и др., 2016; Полякова, 2011; Полякова, Гофаров, 2012).

Анализ результатов (см. *рис. 1, 7*) показывает, что минимум потенциальной урожайности сорговых в условиях Новгородской области составляет 30 т/га (см. цветовую шкалу урожайности на *рис. 7а*), что соответствует максимальной урожайности традиционных кормовых культур. На землях же с повышенной теплообеспеченностью при замене традиционных вико-овсяных и вико-гороховых смесей на сорговые культуры можно получить прибавку урожая зелёной массы на 30–45 т/га (см. участок, показанный стрелкой на *рис. 7а*).

Следует также отметить ещё один положительный момент интродукции сорговых культур при замене традиционных кормовых культур как в Новгородской области, так и в Нечерноземье в целом: в связи с большей урожайностью (биомассой) сорговые имеют более высокий секвестрационный потенциал поглощения углерода из атмосферы, что может внести вклад в снижение угрозы экологических последствий глобального потепления климата.

Считается, что современная растительность Европы соответствует растительности периода климатического оптимума в Голоцене ~5000 лет назад (Попов, 2000). Таким образом, с момента окончания ледникового периода ~11–12 тыс. лет назад (Rapp, 2012) растительность перестраивалась несколько тысяч лет. Поэтому можно предположить, что естественное

проникновение на наиболее теплообеспеченные земли Новгородской области азональных дубрав методом проб и ошибок потребовало значительного времени, возможно, что и тысячи лет. Как показывает настоящее исследование, технология, основанная на использовании больших баз данных цифровой спутниковой информации, позволяет значительно быстрее решить задачу выявления наиболее теплообеспеченных земель. Поэтому технологию интродукции теплолюбивых культур, первый этап которой представлен в этой работе, можно отнести к классу природоподобных технологий. Для окончательного доказательства эффективности предложенной природоподобной технологии целесообразно провести сравнительные агроэкологические испытания с теплолюбивыми интродуцентами на землях с различной теплообеспеченностью, выявленных в рамках настоящего исследования.

Заключение

Проведённые исследования показали:

– что за многолетний период с 2016 по 2024 г. в весенне-летний сезон (май–июнь) в Новгородской области на землях сельскохозяйственного назначения отмечена пространственная неоднородность усреднённых САТ ПП, изменяющаяся за период май–июнь от менее чем 600 °С до более чем 800 °С. Наиболее теплообеспеченные земли тяготеют к прибрежной зоне Приильменской низменности и к долинам рек. Это обосновывает проведение направленной интродукции теплолюбивых сельскохозяйственных культур на этих землях;

– целесообразно продолжать агроэкологические исследования для получения более полной базы статистических данных. Одной из задач дальнейших исследований должна быть практическая верификация разработанного алгоритма — продолжение исследований с сорговыми культурами как на опытных землях Новгородского НИИСХ, так и на выявленных, наиболее теплообеспеченных участках;

– после опытной верификации предложенный алгоритм обнаружения земель сельскохозяйственного назначения с повышенными значениями САТ ПП, базирующийся на использовании больших баз цифровых спутниковых материалов, может быть рекомендован для применения при интродукции других теплолюбивых культур как в Новгородской области, так и в Нечернозёмной зоне в целом.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания ФГБНУ «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук»: «Разработать теоретические и технологические основы увеличения производства сельскохозяйственной продукции в условиях изменения климата в Новгородской области с целью обеспечения продовольственной безопасности и импортозамещения» (тема FFZF-2025-0009, рег. № НИОКР 1022041500149-1), FFZF-2022-0011 и «Разработка методов мониторинга здоровья экосистем Северо-Запада России» (FFZF-2023-0001).

Литература

1. Андреева Е. Н., Балун О. В., Журавлёва О. С., Катаева О. А., Конечная Г. Ю., Крупкина Л. И., Юрова Э. А. Кадастр флоры Новгородской области. 2-е изд., перераб. и доп. Великий Новгород: Изд-во «ЛЕМА», 2009. 276 с.
2. Артемьев А. А., Таракин И. П. Адаптивная технология возделывания сорго сахарного (*Sorghum Moench.*) в Республике Мордовия // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2016. № 5 (54). С. 36–41.
3. Балун О. В., Шкодина Е. П. Влияние агрометеорологических факторов на продолжительность вегетации и урожайность зеленой массы суданской травы линия Землячка // Аграрная наука. 2024. № 5. С. 85–90. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-382-5-85-90>.
4. Горный В. И. Распределение конвективного теплового потока в Беломорском регионе по данным дистанционного геотермического метода // Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / под ред. Ю. Г. Шварцмана, И. Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С. 26–29.

5. Горный В. И., Теплякова Т. Е. О влиянии эндогенного тепла Земли на формирование в бореальной зоне локальных ареалов неморальной растительности // Докл. акад. наук. 2001. Т. 378. № 5. С. 679–680.
6. Горный В. И., Шилин Б. В., Ясинский Г. И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
7. Горный В. И., Латыпов И. Ш., Теплякова Т. Е., Воякина Е. Ю. Верификация результатов дистанционного геотермического метода при изучении природы формирования аazonальной экосистемы Большого Соловецкого острова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 36–45.
8. Горный В. И., Селезнев Г. А., Тронин А. А. Применение тепловой космической съемки для поисков слаботермальных вод // Разведка и охрана недр. 2016. № 1. С. 49–57.
9. Горный В. И., Киселев А. В., Крицук С. Г. и др. Спутниковое картирование тепловой реакции подстилающей поверхности Северной Евразии на изменение климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 155–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
10. Гулидова В. А., Гусева Ю. С. Сахарное сорго — альтернатива кукурузе // Вестн. Курской гос. с.-х. акад. 2020. № 3. С. 15–20.
11. Кузьминов С. А., Володин А. Б. Сорго для возделывания на зеленый корм и силос // Новости науки в АПК. 2018. № 2-2 (11). С. 192–197. DOI: 10.25930/zm8a-k404.
12. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 752 с.
13. Муслимов М. Г., Таймазова Н. С., Рамазанова Т. В., Камилова Э. С. Сорговые культуры — источник альтернативных кормов в условиях Республики Дагестан // Изв. Дагестанского ГАУ. 2019. № 1. С. 167–168.
14. Полякова Е. В. Применение методов дистанционного зондирования Земли в изучении арктических термальных экосистем (на примере урочища Пымвашор) // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2011. № 5 (28). С. 279–282.
15. Полякова Е. В., Гофаров М. Ю. Применение аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата при составлении цифровой модели местности (на примере субарктического термального урочища Пымвашор) // Изв. Коми научного центра УрО РАН. 2012. Вып. 3 (11). С. 52–56.
16. Попов С. Ю. История развития растительного покрова в Европе за последние 150 000 лет // Биология. 2000. № 36 (571). С. 11–20.
17. Смирнов И. А. Новгородские дубравы в начале 21 века — состояние и перспективы // Лесное хозяйство: материалы 86-й Научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов. Минск: БГТУ, 2022. С. 306–308.
18. Ториков В. Е., Бельченко С. А., Дронов А. В., Дьяченко В. В., Ланцев В. В. Кукуруза и сорго в интенсивном земледелии юго-запада Центрального региона России. Брянск: Изд-во Брянского ГАУ, 2018. 209 с.
19. Чудновский А. Ф. Теплофизика почв. М.: Наука, 1976. 353 с.
20. Шкодина Е. П., Балун О. В. Агроэкологические испытания нетрадиционных для Новгородского региона однолетних кормовых культур для укрепления кормовой базы в Нечерноземной зоне // Аграрная наука. 2023. № 1. С. 56–60. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-366-1-56-60>.
21. Gornyy V., Balun O., Kiselev A., Kritsuk S., Latypov I., Tronin A. (2023a) Signs of a significant endogenous component in the thermal regime of soils on agricultural lands of the Novgorod region // Agriculture Digitalization and Organic Production. Proc. 3rd Intern. Conf. “Agriculture Digitalization and Organic Production (ADOP 2023)”. Smart Innovation, Systems and Technologies. V. 362. Singapore: Springer, 2023. P. 339–348.
22. Gornyy V. I., Balun O. V., Kiselev A. V. et al. (2023b). Multiyear variations of soil moisture availability in the East European Plain // Geography, Environment, Sustainability. 2023. V. 16. No. 4. P. 120–124. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2811>.
23. Hajjarpoor A., Eltigani A., Seiler C., Matros A., Kottmann L., Balko C., Windpassinger S., Goldbach J., Eder J., Rahman A. S., Quade M., Jorzig C., Perovic D., Stahl A., Feike T. Germany-wide suitability analysis of sorghum cultivation for climate change mitigation // 64. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V.: Digital tools, big data, modeling and sensing methods for sustainable and climate smart crop and grassland systems. Göttingen, Deutschland: Liddy Halm, 2023. P. 95–96.
24. Hajjarpoor A., Hafezi F., Shawon A. R., Seiler C., Eltigani A., Goldbach J., Sabboura D., Kottmann L., Feike T. Spatiotemporal suitability analysis of sorghum in Germany under climate change // 18th Congress of the European Society for Agronomy “Synergies for a resilient future: from knowledge to action”: Book of Abstr. ESA, 2024. P. 266–273.
25. Rapp D. Ice ages and interglacials: Measurements, interpretation, and models. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 432 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30029-5>.

26. Sauer A. M., Loftus S., Schneider E. M. et al. Sorghum landraces perform better than a commonly used cultivar under terminal drought, especially on sandy soil // *Plant Stress*. 2024. V. 13. Article 100549. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100549>.
27. Schaffasz A., Windpassinger S., Friedt W. et al. Sorghum as a novel crop for Central Europe: Using a broad diversity set to dissect temperate-adaptation // *Agronomy*. 2019. V. 9. No. 9. Article 535. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090535>.
28. Wan Z., Hook S., Hulley G. (2021a) MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061>.
29. Wan Z., Hook S., Hulley G. (2021b) MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD11A1.061>.

Algorithm for using satellite imagery to identify promising areas for introduction of heat-loving agricultural crops: A case study of Novgorod Region

V. I. Gornyy¹, O. V. Balun¹, A. V. Kiselev¹,
I. A. Smirnov², A. A. Tronin¹, E. P. Shkodina¹

¹ Saint Petersburg Federal Research Center RAS, Saint Petersburg 199178, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

² Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod 173003, Russia

The observed climate warming has highlighted the importance of introducing heat-loving, high-yielding crops in the Non-Chernozem Zone of Russia. However, not all areas of this zone have reached the required active temperature for growing these crops. Thus, the purpose of this study is to develop an algorithm that uses satellite imagery to identify areas with increased heat availability, which is the first step towards introduction of these crops in the Non-Chernozem region. It is known that the thermal regime of soils depends on meteorological factors, agrophysical properties of soils, insolation levels of different forms of terrain, and presence of endogenic heating. Therefore, it is important to identify the most thermally favorable agricultural lands for economically viable cultivation of heat-loving exotic plants. To address this issue, Novgorod Region has been chosen as the focus of research, as Novgorod Agricultural Research Institute has been conducting agroecological trials of heat-loving sorghum varieties since 2016. The results of this long-term research form the basis for creating forecast maps of potential sorghum crop yields and identifying promising areas for cultivation. To generate these maps, we used a large amount of digital data from daily satellite infrared-thermal images collected during warm seasons in Novgorod Region over the past 20 years. The study provides a justification for the algorithm for mapping the sorghum yield forecast in Novgorod Region. An analysis of the spatio-temporal variability of heat supply in agricultural lands in Novgorod Region has been conducted. It is shown that an increase in heat supply to lands is expected by 2030, which will lead to an increase in sorghum yields. It is concluded that the developed technology can also be applied to other heat-loving plants.

Keywords: global warming, soils, heat-loving crops, introduction of sorghum, Novgorod Region, agroecological research, satellite thermal images, algorithm, yield forecast

Accepted: 21.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-64-80

References

1. Andreeva E. N., Balun O. V., Zhuravleva O. S., Kataeva O. A., Konechnaya G. Yu., Krupkina L. I., Yurova E. A., *Kadastr flory Novgorodskoi oblasti* (Flora cadastre of the Novgorod region), 2nd ed., revised and enlarged, Velikii Novgorod: Izd. "LEMA", 2009, 276 p. (in Russian).
2. Artemyev A. A., Tarakin I. P., Adaptive technology of sweet sorghum (*Sorghum Moench.*) cultivation in the Republic of Mordovia, *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*, 2016, No. 5 (54), pp. 36–41 (in Russian).
3. Balun O. V., Shkodina E. P., The influence of agrometeorological factors on the duration of vegetation and the yield of the green mass of the Sudanese grass Zemlyachka line, *Agrarian science*, 2024, No. 5, pp. 85–90 (in Russian), <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-382-5-85-90>.
4. Gornyy V. I., Distribution of convective heat flow in the White Sea region according to remote geothermal method data, In: *Prirodnaya sreda Solovetskogo arhipelaga v usloviyakh menyayushchegosya klimata* (Natural environment of the Solovetsky Archipelago in conditions of changing climate), Yu. G. Shvartsman, I. N. Bolotov (eds.), Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie RAN, 2007, pp. 26–29 (in Russian).
5. Gornyy V. I., Teplyakova T. E., On the influence of the Earth's endogenous heat on the formation of local areas of nemoral vegetation in the boreal zone, *Doklady akademii nauk*, 2001, V. 378, No. 5, pp. 679–680 (in Russian).
6. Gornyy V. I., Shilin B. V., Yasinsky G. I., *Teplovaya aehrokosmicheskaya s'emka* (Thermal aerospace survey), Moscow: Nedra, 1993, 128 p. (in Russian).
7. Gornyy V. I., Latypov I. S., Teplyakova T. E., Voyakina E. Y., Verification of remote geothermal method results at the Big Solovetskii Island while investigation of reasons of extrazonal ecosystem formation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Iss. 6, V. 2, pp. 36–45 (in Russian).
8. Gornyy V. I., Seleznev G. A., Tronin A. A., Application of thermal space photography for searching for weakly thermal waters, *Prospect and Protection of Mineral resources*, 2016, No. 1, pp. 49–57 (in Russian).
9. Gornyy V. I., Kiselev A. V., Kritsuk S. G. et al., Satellite mapping of the thermal response of ecosystems of Northern Eurasia to climate change, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 6, pp. 155–164 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
10. Gulidova V. A., Guseva Yu. S., Sweet sorghum — an alternative to corn, *Bull. Kursk State Agricultural Academy*, 2020, No. 3, pp. 15–20 (in Russian).
11. Kuzminov S. A., Volodin A. B., Sorghum for cultivation for green fodder and silage, *Novosti nauki v APK*, 2018, No. 2-2 (11), P. 192–196 (in Russian), DOI: 10.25930/zm8a-k404.
12. Matveev L. T., *Osnovy obshchei meteorologii. Fizika atmosfery* (Fundamentals of General Meteorology. Physics of the Atmosphere), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984, 752 p. (in Russian).
13. Muslimov M. G., Taymazova N. S., Ramazanova T. V., Kamilova E. S., Sorghum crops — a source of alternative feed in the conditions of the Republic of Dagestan, *Izvestiya Dagestanskogo GAU*, 2019, No. 1, pp. 167–168 (in Russian).
14. Polyakova E. V., Application of Earth remote sensing methods in the study of arctic thermal ecosystems (using the Pymvashor tract as an example), *Current Problems of Humanities and Natural Sciences*, 2011, No. 5, V. 28, pp. 279–282 (in Russian).
15. Polyakova E. V., Gofarov M. Yu., Application of aerial photography from an unmanned aerial vehicle in the preparation of a digital terrain model (using the subarctic thermal tract Pymvashor as an example), *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya RAN*, 2012, Iss. 3(11), pp. 52–56 (in Russian).
16. Popov S. Yu., History of the development of vegetation in Europe over the past 150,000 years, *Biologiya*, 2000, No. 36 (571), pp. 11–20 (in Russian).
17. Smirnov I. A., Novgorod oak groves at the beginning of the 21st century — state and prospects, *Lesnoe khozyaistvo: materialy 86-i Nauchno-tehnicheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* (Forestry: materials of the 86th scientific and technical conference of faculty, researchers and postgraduate students), Minsk: BSTU, 2022, pp. 306–308 (in Russian).
18. Torikov V. E., Belchenko S. A., Dronov A. V., D'yachenko V. V., Lantsev V. V., *Corn and sorghum in intensive farming of the southwest of the Central region of Russia*, Bryansk: Publ. house of Bryansk State Agrarian Univ., 2018, 209 p. (in Russian).
19. Chudnovsky A. F., *Teplofizika pochv* (Thermal physics of soils), Moscow: Nauka, 1976, 353 p. (in Russian).
20. Shkodina E. P., Balun O. V., Agro-ecological tests of annual fodder crops unconventional for the Novgorod region to strengthen the forage base in the Non-Chernozem zone, *Agrarian science*, 2023, No. 1, pp. 56–60 (in Russian), <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-366-1-56-60>.
21. Gornyy V., Balun O., Kiselev A., Kritsuk S., Latypov I., Tronin A. (2023a), Signs of a significant endogenous component in the thermal regime of soils on agricultural lands of the Novgorod region, In: *Agriculture Digitalization and Organic Production. Proc. 3rd Intern. Conf. "Agriculture Digitalization and Organic*

- Production (ADOP 2023)*”, Smart Innovation, Systems and Technologies, V. 362, Singapore: Springer, 2023, pp. 339–348.
22. Gornyy V. I., Balun O. V., Kiselev A. V. et al. (2023b), Multiyear variations of soil moisture availability in the East European Plain, *Geography, Environment, Sustainability*, 2023, V. 16, No. 4, pp. 120–124, [https://DOI-10.24057/2071-9388-2023-2811](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2811).
 23. Hajjarpoor A., Eltigani A., Seiler C., Matros A., Kottmann L., Balko C., Windpassinger S., Goldbach J., Eder J., Rahman A. S., Quade M., Jorzig C., Perovic D., Stahl A., Feike T., Germany-wide suitability analysis of sorghum cultivation for climate change mitigation, *64. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V.: Digital tools, big data, modeling and sensing methods for sustainable and climate smart crop and grassland systems*, Göttingen, Deutschland: Liddy Halm, 2023, pp. 95–96.
 24. Hajjarpoor A., Hafezi F., Shawon A. R., Seiler C., Eltigani A., Goldbach J., Sabboura D., Kottmann L., Feike T., Spatiotemporal suitability analysis of sorghum in Germany under climate change, *18th Congress of the European Society for Agronomy “Synergies for a resilient future: from knowledge to action”*: Book of Abstr., ESA, 2024, pp. 266–273.
 25. Rapp D., *Ice ages and interglacials: Measurements, interpretation, and models*, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, 432 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30029-5>.
 26. Sauer A. M., Loftus S., Schneider E. M. et al., Sorghum landraces perform better than a commonly used cultivar under terminal drought, especially on sandy soil, *Plant Stress*, 2024, V. 13, Article 100549, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100549>.
 27. Schaffas A., Windpassinger S., Friedt W. et al., Sorghum as a novel crop for Central Europe: Using a broad diversity set to dissect temperate-adaptation, *Agronomy*, 2019, V. 9, No. 9, Article 535, <https://doi.org/10.3390/agronomy9090535>.
 28. Wan Z., Hook S., Hulley G. (2021a), *MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061*, NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061>.
 29. Wan Z., Hook S., Hulley G. (2021b), *MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061*, NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD11A1.061>.