

Региональный прогноз урожайности полевых культур по аномалиям глобальных параметров климатической системы планеты

А.А. Неверов, к.с.-х.н., ФБГНУ ФНЦ БСТ РАН

В настоящее время проблема глобального потепления остаётся дискуссионной. По сообщению ряда авторов [1], следы периодических изменений климата на планете Земля зафиксированы

в строении донных осадков морей и океанов, в структуре годовых колец многовековых деревьев, в аэрозолях кернов полярного льда и т.д. Был сделан вывод, что изменения глобальной температуры приземного воздуха с середины прошлого века могут быть обусловлены круп-

номасштабными изменениями солнечной активности [2, 3].

Как полагает В.В. Навроцкий, в масштабах десятилетий основной интерес представляют «быстрые колебания с большими амплитудами, которые, по утверждению климатологов, не были характерны для прошлых тысячелетий... В климатической системе Земли непрерывно происходят взаимные преобразования тепловой и механической энергии и аккумуляция энергии в органическом веществе, но в нулевом приближении можно рассматривать температуру как существенную характеристику энергетического состояния системы» [3].

Основными физическими компонентами климатической системы являются океан, атмосфера, суша и криосфера, а также биосистемы, участвующие в преобразовании солнечной энергии и присутствующие во всех компонентах климатической системы [4].

Роль океана в тепловом балансе Земли очень велика. Установлено, что на океан приходится около 90% от глобального изменения содержания тепла. При этом оно в 28,4 раза больше, чем в атмосфере, и в 18,4 раза больше, чем на континентах. А.В. Кислов считает, что в последние десятилетия из-за резкого уменьшения зелёной массы на планете значительно возросло альбедо (отражательная способность) суши, меньше солнечной энергии накапливается в органическом веществе суши, в результате чего избыточная солнечная энергия трансформируется в тепловую энергию Мирового океана [5].

По результатам проведённого анализа о влиянии крупномасштабного 200-летнего солнечного цикла на глобальные климатические параметры исследователи пришли к выводу о существовании нелинейного отклика в системе океан – атмосфера на вариации солнечной активности [6].

Изменения теплового режима Мирового океана, аккумулирующего солнечную энергию и трансформирующего её в энергию атмосферных процессов, вносят наибольший вклад в формирование погоды и климата на планете. Также подтверждено существование энергетической связи между солнечной активностью и тепловым режимом океана – глобальная температура поверхности океана тесно коррелирует с геомагнитной активностью на планете [7].

Влияние Мирового океана на трансформацию атмосферных процессов над сушей нами рассматривается как промежуточное звено в цепочке: солнечная активность – погода над регионом суши. Инерция теплопереноса в океане относительно проявления в будущем погоды над сушей позволила нам осуществить попытку долгосрочного прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в Оренбургской области по аномалиям температуры поверхностных вод Мирового океана в предшествующие урожаю периоды.

Цель исследования – изучить возможность долгосрочного прогнозирования урожайности

сельскохозяйственных культур в Оренбургской области синоптико-статистическим методом [8] по среднемесячным аномалиям температуры поверхностных вод Мирового океана и приземного слоя воздуха суши.

Материал и методы исследования. В качестве объекта исследования выбран временной ряд средней урожайности семян подсолнечника Оренбургского района Оренбургской области за период 1950–2017 гг.

Предикторами в моделях служили аномалии среднемесячной температуры поверхностных вод Мирового океана и приземного слоя атмосферы (отклонения от средней по ряду температуры периода 1910–2000 гг. в градусах Цельсия):

- глобально всей планеты (океана, суши, суши и океана) с 1880 по н.в.;
- Северного полушария (океана, суши, суши и океана) с 1880 по н.в.;
- основного региона развития ураганов Атлантического бассейна (Atlantic Main Development Region (MDR), между 10–20° северной широты и 20–85° западной долготы за период с 1910 по настоящее время.

Данные по аномалиям температуры получены с сайта Национального центра климатических данных США [9].

Для изучения влияния глобальных параметров климатической системы на урожайность сельскохозяйственных культур в Оренбургской области нами использовались принципы синоптико-статистического метода В.М. Лебедевой, разработанного в ФГБУ ВНИИСХМ [8]. Особенностью этого подхода является использование данных с карт барической топографии (АТ-500), значений температуры поверхности воды Тихого и Атлантического океанов, данных о центрах действия атмосферы, индексах южного и североатлантического колебаний в осенне-зимний период.

Отличие нашего подхода от метода В.М. Лебедевой заключается в использовании в качестве предикторов глобальных аномалий температуры поверхностных вод Мирового океана и приземного слоя воздуха над сушей Северного полушария и глобально всей планеты. В.М. Лебедева показала связь средней урожайности сельскохозяйственных культур по округам РФ [8], нами исследованы связи урожайности подсолнечника небольшой по площади территории района с глобальными факторами погоды.

Выбор предикторов и построение прогнозных моделей осуществлялось с помощью корреляционно-регрессионного анализа в программе Statistica 6.1. Предварительно проводился кросскорреляционный анализ влияния всех предикторов на результативный фактор с последующим лаг-преобразованием переменных для учёта инерции теплопереноса в Мировом океане.

Прогнозирование осуществлялось с помощью нейросетевого анализа в задачах регрессии: обуча-

лась сеть многослойного персептрона с логистической функцией активации нейронов.

Результаты исследования. В целях исключения мультиколлинеарности факторов в модели выбор для анализа искусственной нейронной сети не случаен. Известно, что параметры климатической системы планеты взаимосвязаны между собой, однако каждый параметр вносит свой вклад в динамику атмосферных процессов и в конечном итоге может влиять на формирование урожая сельскохозяйственных культур в отдельно взятом регионе. Во множественной регрессии взаимосвязь между предикторами не позволяет использовать многие факторы климатической системы для адекватного описания отклика на изменения параметров системы.

Для обучения многослойного персептрона в качестве предикторов выбраны параметры аномалий среднемесячной температуры поверхностных вод Мирового океана и приземного слоя воздуха суши Северного полушария, всей планеты и основного региона развития ураганов Атлантического бассейна (MDR) за период с 1950 по 2017 гг., всего 240 предикторов.

В расчётах была учтена тепловая инерция Мирового океана, для чего введены лаговые переменные климатических аномалий до трёх лет включительно.

В результате длительного периода обучения трёхслойного персептрона получено несколько адекватных моделей связи урожайности подсолнечника с аномалиями температуры климатической системы планеты. Оценка адекватности модели проводилась по наименьшей величине отношения стандартного отклонения ошибки к стандартному отклонению данных в обучающей, контрольной и тестовой выборках (табл. 1).

Известно, что отношение стандартного отклонения ошибки к стандартному отклонению данных выражается в долях единицы и в лучших моделях не должно превышать 0,2, или 20%. В нашем случае во всех моделях – №118, 122, 124–125 по обучающей, контрольной и тестовой выборкам ошибка была минимальна и варьировала от 0,05 до 0,18.

Объёмы обучающей, контрольной и тестовой выборок формировались автором, а определение того или иного года в выборках происходило по

алгоритму выбора случайных чисел в программе.

Средняя абсолютная ошибка урожайности семян подсолнечника в моделях варьировала от 0,04 до 0,5 ц с 1 га.

Оценка параметров моделей была проведена по всем выборкам, они полностью подтвердили высокое качество моделей. В качестве примера показана в сравнении урожайность семян подсолнечника фактическая ($Y_{ф}$) и прогнозная ($Y_{пр}$) в контрольной и тестовой выборках, полученных в моделях № 122 и 124 (табл. 2). Объём контрольной и тестовой выборок задавался по 5 лет в каждой, соответственно в обучающей выборке объём был равен 58 годам. Отклонения прогнозного значения урожайности от фактического во всех выборках не превышали 10%.

Это означает, что факторы, вошедшие в модель прогнозирования урожайности подсолнечника, достоверно детерминировали его изменчивость.

Архитектура трёхслойного персептрона показана в таблице 3.

Обучение сетей проходило в два этапа: на первом этапе – методом обратного распространения (ОР) 100 эпох, на втором – методом сопряжённых градиентов (СГ) – 500 эпох. Из 240 предикторов программой были отобраны на вход 85–86, в скрытом слое каждой сети содержалось по 16 нейронов, а на выходе по одному.

В таблице показано краткое описание алгоритмов обучения, используемых для оптимизации сети. Оно хранит несколько кодов с последующим числом эпох, в которых применялся итеративный алгоритм, и необязательный код остановки, который показывает, как была выбрана финальная сеть. Например, код «СГ38b» показывает, что был использован метод сопряжённых градиентов, была выбрана лучшая найденная сеть (по лучшей, т.е. минимальной контрольной ошибке), и что эта сеть была найдена на 38-й эпохе.

Из поданных на вход 85–86 переменных наиболее значимыми для урожайности подсолнечника оказались следующие предикторы: аномалии температуры поверхностного слоя воды Мирового океана в апреле 2015 г., а также приземного слоя воздуха суши в ноябре и декабре 2015 г., океана и суши Северного полушария в мае и сентябре 2016 г. и в январе текущего года.

1. Описательная статистика регрессионных моделей

Статистические параметры	Обучающая выборка моделей				Контрольная выборка моделей				Тестовая выборка моделей			
	118	122	124	125	118	122	124	125	118	122	124	125
Среднее данных, ц с 1 га	5,14	5,36	5,11	5,02	4,90	2,78	6,24	4,70	5,02	4,64	4,04	6,54
Станд. откл. данных, ц с 1 га	2,55	2,66	2,57	2,66	3,30	2,01	2,54	2,00	2,93	1,60	3,03	2,53
Среднее ошибки	-0,04	0,02	-0,02	-0,06	0,02	-0,09	0,02	0,00	-0,41	-0,19	-0,01	-0,02
Станд. откл. ошибки	0,46	0,35	0,31	0,36	0,28	0,27	0,13	0,05	0,44	0,26	0,28	0,44
Среднее абсолютной ошибки, ц с 1 га	0,32	0,21	0,19	0,25	0,24	0,25	0,11	0,04	0,50	0,23	0,24	0,38
Отношение станд. откл. ошибки к станд. откл. данных	0,18	0,13	0,12	0,14	0,09	0,14	0,05	0,03	0,15	0,16	0,09	0,17

2. Оценка качества контрольных и тестовых выборок по урожайности семян подсолнечника

Контрольная выборка № 122			Контрольная выборка № 124			Тестовая выборка № 122			Тестовая выборка № 124		
год	У _ф	У _{пр}	год	У _ф	У _{пр}	год	У _ф	У _{пр}	год	У _ф	У _{пр}
1953	2,1	2,1	1962	3,1	3,3	1956	3,2	3,1	1954	1,0	1,1
1959	0,8	0,9	1964	9,3	9,4	1981	2,5	2,6	1957	3,7	3,5
1984	2,7	2,3	1970	7,1	7,0	1994	5,0	4,9	1967	1,5	1,6
1992	6,6	6,2	1989	8,3	8,4	2003	5,6	5,4	1968	9,5	9,1
1995	1,7	1,9	1999	3,4	3,3	2011	6,9	6,2	1991	4,5	4,9

3. Архитектура нейронных сетей в задачах регрессии

Номер сети	Архитектура	Ошибка обучения	Контрольная ошибка	Тестовая ошибка	Обучение/Элементы	Входы	Скрытые (1)
118	МП 86:86-16-1:1	0,04	0,02	0,05	OP100,CG6b	86	16
122	МП 86:86-16-1:1	0,03	0,02	0,03	OP100,CG38b	86	16
124	МП 85:85-16-1:1	0,03	0,01	0,02	OP100,CG16b	85	16
125	МП 85:85-16-1:1	0,03	0,004	0,04	OP100,CG4b	85	16

Временной ряд урожайности подсолнечника положительно коррелировал ($r = 0,4$) с временным рядом аномалии температуры поверхностных вод Мирового океана, осреднённого по планете за апрель и сдвинутого на 3 года вперёд (рис. 1).

Вероятно, эта связь заключалась в следующем: процессы трансформации тепловой энергии в океане, обладающего огромной теплоёмкостью, не способны мгновенно воздействовать на климатическую систему в целом и вносят определённую долю влияния на формирование урожая подсолнечника через изменения погодных условий сельскохозяйственного года с временной задержкой на территории локального региона суши, в данном случае Оренбургского района Оренбургской области.

Нами обнаружена аналогичная и ещё более тесная связь ($r = 0,6$) между рядами урожайности подсолнечника и аномалией температуры океана Северного полушария в сентябре (лаг – 3 года вперёд по ряду температуры) (рис. 2).

Связь температурной аномалии океана очевидна с урожайностью подсолнечника на отрезке времени с 1979 по 2018 г. Рост глобальной температуры Мирового океана (рис. 1), а также температуры океана в Северном полушарии (рис. 2) способствует росту урожайности подсолнечника в отдалённом от всех океанов и морей степном регионе Оренбургской области.

Необходимо подчеркнуть, что тенденция роста урожайности подсолнечника в последние два десятилетия в связи с изменениями климатических условий на планете, в том числе и в Оренбургской области, является исключением из правил, поскольку ранее проведённые нами исследования [10–15] свидетельствуют о негативной тенденции снижения урожайности всех основных зерновых и кормовых культур в степной зоне Оренбуржья.

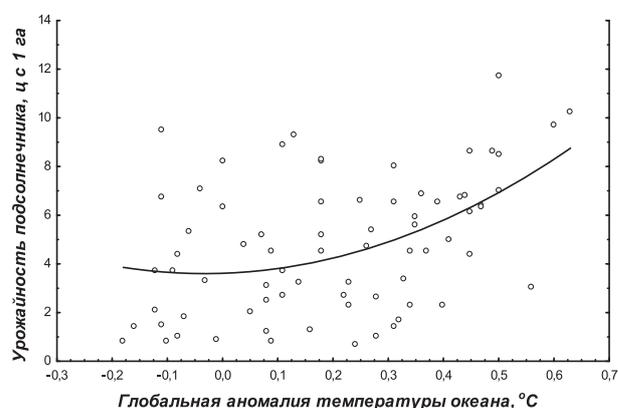


Рис. 1 – Влияние лаг-преобразованного ряда ($L=3$) среднемесячной аномалии температуры Мирового океана планеты в апреле на урожайность семян подсолнечника



Рис. 2 – Взаимосвязь урожайности подсолнечника и лаг-преобразованного ряда ($L=3$) аномалии температуры океана в Северном полушарии в сентябре

4. Прогноз урожайности семян подсолнечника на 2018 и 2019 годы, ц с 1 га

Год	Урожайность фактическая	Урожайность расчётная по моделям				Урожайность расчётная по ансамблю моделей
		№118	№122	№124	№125	
2000	5,9	7,1	7,0	6,1	6,5	6,7
2001	3,0	3,2	3,1	3,1	2,9	3,1
2002	4,5	4,5	4,8	4,6	4,5	4,6
2003	5,6	6,2	5,4	5,6	5,6	5,7
2004	6,7	7,1	6,9	7,0	7,1	7,0
2005	7,0	7,4	7,3	7,3	7,4	7,4
2006	6,4	6,3	6,5	6,5	6,4	6,4
2007	8,6	6,7	6,9	7,0	7,1	6,9
2008	11,7	11,4	11,4	11,5	11,5	11,5
2009	8,6	8,5	8,7	8,8	8,9	8,7
2010	4,4	4,2	4,4	4,5	4,3	4,4
2011	6,9	6,9	6,2	7,0	7,2	6,8
2012	6,3	6,9	7,0	7,0	7,1	7,0
2013	10,2	10,4	10,2	10,3	10,4	10,3
2014	6,8	6,7	6,9	6,7	6,8	6,8
2015	6,1	6,5	6,4	6,3	6,4	6,4
2016	8,5	8,7	8,4	8,5	8,6	8,6
2017	9,7	9,1	9,5	9,6	9,8	9,5
2018	–	7,2	7,3	7,3	7,6	7,4
2019	–	7,5	7,2	7,6	7,7	7,5

Таким образом, в последнее время подсолнечник становится более привлекательной культурой для аграриев в экономическом отношении.

С помощью регрессии в нейронных сетях получены расчётные значения урожайности семян подсолнечника на период 2000–2017 гг. и прогноз на 2018 и 2019 гг. в сравнении с наблюдаемой фактической урожайностью (табл. 4).

Наблюдаемая и расчётная урожайность во всех моделях близки между собой, средняя абсолютная ошибка моделей не превысила 0,5 ц с 1 га во всех выборках моделей.

Прогнозные значения урожайности на 2018 и 2019 гг. также близки во всех моделях, средние значения по ансамблю моделей составили 7,4 и 7,5 ц с 1 га соответственно. На момент проведения исследования данные о фактической урожайности подсолнечника в 2018 г. ещё не были опубликованы в статистическом бюллетене о валовом сборе и урожайности сельскохозяйственных культур, поэтому прогноз получился на два года вперёд.

Выводы. Учитывая значительный вклад Мирового океана в изменение теплового режима климатической системы планеты, а также инерцию океана в теплопереносе, показана возможность долгосрочного прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на примере под-

солнечника в Оренбургской области синоптико-статистическим методом по среднемесячным аномалиям температуры поверхностных вод Мирового океана и приземного слоя воздуха суши.

Для применения и распространения данного метода для долгосрочного прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур в небольших по площади регионах необходимо провести дополнительную проверку точности этого метода.

Литература

1. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. Климатические ритмы теплового режима Мирового океана // Природа. 2016. № 8 (1212). С. 26–33.
2. Дергачёв В.А., Распопов О.М. Долговременная солнечная активность – контролирующий фактор глобального потепления XX века // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 2. С. 272–275.
3. Навроцкий В.В. Мировой океан и глобальные изменения климата // Вестник ДВО РАН. 2013. №6 (172). [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mirovoy-ocean-i-globalnyie-izmeneniya-klimata> (дата обращения: 15.10.2018).
4. Жеребцов Г.А. Солнечная активность и динамические процессы в атмосфере и теплосодержании Мирового океана / Г.А. Жеребцов, В.А. Коваленко, С.И. Молодых [и др.] // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 2. С. 268–271.
5. Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. М.: Наука, 2001. 351 с.
6. Распопов О.М. Интерпретация физических причин глобального и регионального климатических откликов на долговременные вариации солнечной активности / О.М. Распопов, В.А. Дергачёв, О.В. Козырева [и др.] // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 2. С. 276–278.
7. Жеребцов Г.А. Влияние солнечной активности на температуру тропосферы и поверхности океана / Г.А. Жеребцов, В.А. Коваленко, С.И. Молодых [и др.] // Известия Иркутского государственного университета: Серия «Науки о Земле», 2013. Т. 6. № 1. С. 61–79.
8. Лебедева В.М. Долгосрочный синоптико-статистический метод прогноза валового сбора зерновых культур по федеральным округам и России в целом // Труды ВНИИСХМ. 2010. Вып. 37. С. 69–81.
9. Национальный центр климатических данных. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/nhem/ocean/1/9/1880-2018> (дата обращения 25.12.2018).
10. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада, лтд, 2013. 144 с.
11. Неверов А.А. Влияние погодных факторов на продуктивность ячменя в восточной зоне Оренбургской области // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2017. 8 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2017-3/Articles/NAA-2017-3.pdf>.
12. Неверов А.А. Математическое моделирование связей урожайной озимой ржи с погодноклиматическими условиями в центральной зоне Оренбургской области (цикл статей по теме «Исследования методами нейросетевого анализа влияния региональных изменений климата на продуктивность агрофитоценозов») // Вестник мясного скотоводства. 2015. № 3 (91). С. 125–131.
13. Неверов А.А. Роль погодно-климатических факторов восточной зоны Оренбуржья в формировании урожая проса // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2017. № 3. 9 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2017-3/Articles/AAN-2017-3.pdf>.
14. Неверов А.А. Долгосрочное прогнозирование урожайности полевых культур в Оренбургском Приуралье на основе ретроспективной экстраполяции временного ряда // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. № 4 (72). С. 89–93.
15. Неверов А.А. Современные тенденции изменения климата в Оренбургской области // Вестник мясного скотоводства. 2015. № 1 (89). С. 117–121.