

## АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЕВ КАРТОФЕЛЯ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

**Костюк В.И.**

доктор биологических наук, главный научный сотрудник,  
Полярно-альпийский ботанический сад-институт  
Кольского научного центра РАН (г. Апатиты, Россия)  
vikos47@mail.ru

**Аннотация.** На основе многомерного анализа результатов агроэкологического мониторинга установлено, что колебания урожайности картофеля на Кольском Севере по годам обусловлены не только флуктуациями основных метеорологических элементов - света, температуры и осадков, но и изменениями солнечной активности. С помощью процедур однокритериальной многофакторной оптимизации найдены наиболее благоприятные сочетания перечисленных экзогенных условий для формирования максимальных урожаев картофеля в данном регионе.

**Ключевые слова:** урожайность, метеорологические условия, гелиогеофизическая обстановка, системный подход.

## AGROECOLOGICAL ASPECTS OF THE FORMATION OF POTATO YIELDS ON THE KOLA PENINSULA

**Kostyuk V.I.**

Polar-alpine botanical garden-institute  
Kola scientific centre of RAS (Apatity, Russia)

**Annotation.** On the basis of multi-dimensional analysis of results of agroecological monitoring established that the variation of productivity of potato in the Kola North by year due not only to fluctuations of the main meteorological elements - light, temperature and precipitation, but also changes in solar activity. Using procedures one-criteria multiple-factor optimization found the most favorable combinations listed exogenous conditions for the formation of maximum potato yields in this region.

**Keywords:** productivity, meteorological conditions, heliogeophysics furnished, systematic approach.

**Н**а Кольском Севере продукционный процесс культурных растений осуществляется в условиях умеренных температур воздуха, пониженного прихода солнечной радиации и непрерывного полярного дня в первой половине вегетационного периода (Яковлев, 1961). Это накладывает специфический отпечаток на рост и развитие растений в данном регионе.

В сфере внимания исследователей, изучавших агроклиматические, агрометеорологические и агроэкологические аспекты формирования урожаев картофеля на Кольском Севере, традиционно находились только два метеорологических элемента – температура воздуха и количество осадков (Власова, Будин, 1973; Аникина, Куликова, 1978; Мельничук и др., 1997). Эпизодически изучалось также влияние солнечной радиации на продуктивность картофеля (Костюк, 1980, 1983).

Вместе с тем, необходимо отметить, что продукционный процесс картофеля зависит не только от оперативного влияния света, температуры и осадков, но и находится под постоянным контролем такого гелиогеофизического фактора, как солнечная активность (Чижевский, 1976). Поэтому можно думать, что дополнительный учет этой “фоновой” составляющей в модельных реконструкциях позволит более точно оценивать как общий уровень влияния основных метеорологических элементов на характер формирования урожаев картофеля, так и индивидуальный вклад каждого из них в продукционный процесс.

Представленная работа включает различные подходы к оценке и прогнозу продуктивности картофеля в зависимости от солнечной активности и метеорологических условий вегетационного периода. Реализации этих подходов осуществлялась с использованием современных технологий статисти-

ческого анализа, входящих в программный комплекс STATISTICA 8.

Первый этап работы включал “элементарный” статистический анализ влияния перечисленных факторов на урожайность и крахмалистость картофеля сорта Хибинский ранний. Для создания исходной базы данных были использованы материалы исследований по агроэкологии картофеля на Полярной опытной станции ВИРа в 1983-2005 годах. Общая длина временных рядов по урожайности и крахмалистости картофеля составила 23 года.

Данные о среднемесячных температурах июня, июля и августа, а также о количестве атмосферных осадков, выпадающих в эти месяцы, были предоставлены Апатитской гидрометеорологической станцией Мурманского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Среднемесячные значения величин прихода суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность при реальных условиях облачности для рассматриваемой географической точки (с геометрическим центром 67.5° с.ш. и 33.5° в.д.) получены из следующего интернет-ресурса со свободным режимом доступа - NASA Surface meteorology and Solar Energy (<http://eosweb.larc.nasa.gov>). Месячные значения чисел Вольфа (относительного числа солнечных пятен и их групп) за 23-летний период агроэкологических наблюдений также взяты из общедоступного интернет-источника - [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar\\_data/sunspot\\_numbers](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/sunspot_numbers).

Принятые в статье сокращения и размерность использованных для расчетов показателей: *У* – **урожайность** картофеля, кг/м<sup>2</sup>; *К* – **крахмалистость** клубней,%; *T* – среднемесячная **температура** воздуха, °С; *O* – месячная сумма **осадков**, мм; *P* – среднемесячный приход суммарной солнечной **радиации** на горизонтальную поверхность, кВт/м<sup>2</sup>/сутки; *B* – месячные значения чисел или индекса **Вольфа**.

Обозначения дескриптивных статистик: *X* - среднее арифметическое значение показателя; *R* – абсолютный размах значений показателя (min – max); *SD* – стандартное отклонение; *SE* – стандартная ошибка; *V* - коэффициент относительной вариации (%).

В табл. 1 представлены результаты первичной статистической обработки временных рядов для двух результативных признаков – урожайности и содержания крахмала в клубнях картофеля, для трех метеорологических элементов – светового режима, температуры и осадков, а также для гелиогеофизического фактора - чисел Вольфа. Результаты статистических расчетов для экзогенных факторов воздействия на растения картофеля дифференцированы по трем летним месяцам, которые обозначены следующими цифрами: 6-июнь, 7-июль, 8-август. Таким образом, общее количество внешних неконтролируемых факторов (возмущений), влияющих на продуктивность картофеля, является довольно большим – 12, что, безусловно, осложняет обработку исходных данных и интерпретацию получаемых результатов.

Как видно из табл. 1, наиболее сильно варьировали по годам значения двух показателей – количества атмосферных осадков и индекса Вольфа. Для остальных показателей был характерен умеренный уровень вариабельности. Интересно отметить, что самый узкий диапазон изменчивости температуры воздуха и солнечной активности наблюдался в июле. В этом же месяце зарегистрирована максимальная изменчивость количества выпадающих осадков и притока солнечной радиации к верхней границе (деятельной поверхности) агроценоза картофеля.

Стандартный корреляционный анализ показал, что урожайность картофеля наиболее тесно коррелировала только с двумя показателями – температурой воздуха в июле ( $r = 0.46$ ;  $p = 0.028$ ) и активностью Солнца в июне ( $r = 0.42$ ;  $p = 0.048$ ).

Общую картину влияния экзогенных факторов на урожайность картофеля можно представить в виде следующего ранжированного (по абсолютным величинам коэффициентов корреляции) ряда:  $T7 > T6 > T8$ ;  $O6 > O8 > O7$ ;  $B6 > B7 > B8$ ;  $P6 > P7 > P8$ . Аналогичный ряд влияния данных факторов на крахмалистость клубней выглядит таким образом:  $T7 > T6 > T8$ ;  $O8 > O6 > O7$ ;  $B6 > B7 > B8$ ;  $P6 > P7 > P8$ .

На втором этапе работы экспериментальные данные по урожайности картофеля были разбиты на две

**Статистические характеристики исходных временных рядов для экзогенных факторов и результативных признаков (1983-2005 гг.)**

Показатель	Месяц	R	X	SD	SE	V, %
Урожайность, кг/м <sup>2</sup>	-	3.12-5.09	4.17	0.58	0.12	14.0
Крахмалистость, %	-	9.9-12.9	11.5	0.9	0.2	8.2
Температура воздуха, °С	6	8.1-13.8	11.0	1.6	0.3	14.2
	7	11.5-16.8	14.1	1.5	0.3	10.7
	8	8.9-13.8	11.3	1.3	0.3	11.1
Сумма осадков, мм	6	6-86	46.6	21.0	4.4	45.0
	7	8-171	75.2	37.5	7.8	50.0
	8	17-114	54.9	26.8	5.6	48.9
Солнечная радиация, кВт/м <sup>2</sup> /сутки	6	4.23-6.17	5.34	0.49	0.10	9.2
	7	3.72-5.70	4.80	0.57	0.11	11.3
	8	2.86-4.08	3.49	0.32	0.07	9.1
Числа Вольфа	6	1.1-196.2	71.8	54.0	11.3	75.3
	7	8.2-173.7	73.2	50.1	10.4	68.5
	8	7.4-200.3	73.2	57.0	11.9	77.9

контрастные и статистически однородные группы, с тем, чтобы лучше понять, как метеорологические элементы и солнечная активность влияют на изменчивость урожайности по годам, а также проранжировать экзогенные факторы по силе их влияния на данный отклик.

Для разбиения общего массива данных на две контрастные группы (кластеры, таксоны, типы или классы) использовали нейросетевой подход с применением самоорганизующихся карт Кохонена. По итогам реализации данной процедуры в первую группу вошли годы (объем выборки N = 12 лет) с относительно низкой урожайностью - менее 4.2 кг/м<sup>2</sup>, а во вторую группу - годы (объем выборки N = 11 лет) с урожайностью, превышающей 4.2 кг/м<sup>2</sup> (табл. 2).

Статистические характеристики выделенных групп (кластеров) следующие:

Группа 1: R = 3.12 - 4.07; X = 3.72; SD = 0.34; SE = 0.10; V = 9.2%.

Группа 2: R = 4.26 - 5.09; X = 4.66; SD = 0.33; SE = 0.10; V = 7.2%.

Качество разбиения общего массива данных по урожайности картофеля на две контрастные группы оказалось вполне удовлетворительным. Об этом свидетельствует величина непараметрического H-критерия Краскела-Уоллиса – H ( $\kappa = 1$ ,  $n = 23$ ) = 16.5;  $p = 0.00005$ ; а также значимость HSD-критерия Тьюки для неравных по объему групп ( $p = 0.00015$ ). Статистический анализ межгрупповых различий с помощью LSD-критерия (аналог критерия НСР<sub>05</sub>) показал, что дифференциация уровней урожайности картофеля между группами обусловлена главным образом колебаниями температуры воздуха в июне – Т6 ( $p = 0.037$ ).

Однако логико-ситуационный подход к оценке результатов нейросетевой дискриминации дает основания считать, что повышенная урожайность картофеля в группе 2 (при равной крахмалистости клубней в обеих группах) является результатом кооперативного воздействия комплекса экзогенных факторов.

На заключительном этапе нашей работы был выполнен однокритериальный (по урожайности картофеля) поиск оптимального сочетания количественных уровней экзогенных факторов. Он актуален как с эмпирической, так и с феноменологической точек зрения, поскольку позволяет лучше понять онтогене-

Таблица 2

**Результаты дискриминации урожайных показателей и экзогенных факторов на две контрастные группы (группирующий фактор – урожайность картофеля)**

Показатель	Месяц	Группа 1 (X ± SE)	Группа 2 (X ± SE)	Межгрупповая разность, % (2-1)
Урожайность, кг/м <sup>2</sup>	-	3.72 ± 0.10	4.66 ± 0.10	+25.3
Крахмалистость, %	-	11.5 ± 0.3	11.5 ± 0.3	-
Температура воздуха, °С	6	10.3 ± 0.4	11.7 ± 0.4	+13.6
	7	13.9 ± 0.5	14.3 ± 0.4	+2.9
	8	11.6 ± 0.4	11.0 ± 0.2	-5.2
Сумма осадков, мм	6	42 ± 6	52 ± 6	+23.8
	7	72 ± 12	79 ± 11	+9.7
	8	58 ± 10	51 ± 5	-12.1
Солнечная радиация, кВт/м <sup>2</sup> /сутки	6	5.2 ± 0.2	5.5 ± 0.1	+5.8
	7	4.8 ± 0.2	4.8 ± 0.2	-
	8	3.4 ± 0.1	3.6 ± 0.1	+5.9
Числа Вольфа	6	57 ± 13	88 ± 18	+54.4
	7	62 ± 14	86 ± 16	+38.7
	8	59 ± 14	88 ± 19	+49.2

Это более комфортные температурные условия произрастания растений картофеля в июне и июле, повышенное поступление атмосферных осадков в эти месяцы, лучший световой режим растений картофеля в июне и августе. Но, пожалуй, самый любопытный факт - это высокая солнечная активность в наиболее благоприятные для фотосинтетической продуктивности растений картофеля годы. Она наблюдалась в течение всего периода их вегетации.

технические потребности растений картофеля в погодноклиматических ресурсах Кольского Севера. Вместе с тем, необходимо помнить о “хрупкости” получаемых в ходе подобных расчетов оптимальных решений, которые в общем случае не являются безальтернативными (Тарасенко, 2004). Одному и тому же “наилучшему” значению параметра оптимизации могут соответствовать разные наборы значений факторов или независимых переменных (Антонов, 2004).

Для решения данной задачи использовался модуль *Response Optimization for Data Mining Models* (Оптимизация отклика для моделей добычи данных). В упомянутый модуль загружали XML-файл многофакторной полиномиальной модели, которая приводится ниже в стандартизованных переменных:

$$Y = 6.59 \times T8 - 7.17 \times T8^2 - 0.18 \times O7 + 2.63 \times O8 - 2.90 \times O8^2 + 0.38 \times B6^2 + 0.37 \times P6^2 + 0.63 \times P7. (R^2 = 92.3\%, P \times 0.001)$$

Оптимизацию отклика по приведенному уравнению выполняли с использованием двух алгоритмов. Первый – это симплекс-метод поиска желаемого отклика в пространстве независимых переменных (Simplex search algorithms, аббревиатура - SSA). Он представляет собой управляемый, неградиентный алгоритм поиска, позволяющий определять оптимальный набор значений предикторов за конечное число шагов (STATISTICA..., 2001). Симплекс-метод рассчитан на работу с любым числом независимых переменных и не накладывает никаких ограничений (кроме непрерывности) на целевую функцию. Вторым методом оптимизации – это алгоритм случайного поиска наилучшей комбинации переменных (Random search algorithms, аббревиатура - RSA), который является неуправляемым и требует большой вычислительной мощности. При использовании данного метода для получения репрезентативных значений каждого показателя вычисления повторяли 10 раз.

Тип использованной оптимизации для обоих подходов – поиск заданного значения отклика. Поскольку максимальное значение урожайности картофеля за 23 года наблюдений составило 5.09 кг/м<sup>2</sup>, то для модельных расчетов задавали близкую целочисленную величину - 5 кг/м<sup>2</sup>. Стартовые условия для начала работы обоих алгоритмов – средние многолетние значения экзогенных факторов (табл. 1). Итоги оптимизации по выбранному нами целевому показателю приведены в табл. 3.

Полученные результаты показали, что наиболее важными для продукционного процесса расте-

ний картофеля в условиях Кольского Севера являются первые два месяца их вегетации. Климат данного региона не оказывает негативного влияния на продуктивность изученного генотипа (исключение – поздние весенние и ранние осенние заморозки, а также летние “полярные засухи”), однако для образования максимального хозяйственного урожая картофеля необходимо, чтобы в июне и июле средняя температура воздуха, а также количество выпадающих атмосферных осадков превышали их многолетние величины.

Наиболее значительное увеличение продуктивности картофеля наблюдается в годы с высокой солнечной активностью в летний период, а также при максимальном приходе солнечной радиации к посадкам картофеля в июне и июле, когда появляются всходы, формируется активно работающий фотосинтетический аппарат, происходит процесс образования и накопления массы клубней.

Световое довольствие является, по-видимому, важнейшей характеристикой экологической ниши картофеля на Севере, поскольку кроме фотоэнергетического воздействия оно оказывает также влияние на теплообеспеченность растений. В условиях прохладного северного лета тепловая компонента потока солнечной радиации (видимая и инфракрасная части спектра) может существенно повышать локальную температуру ассимилирующих органов культурных растений (Костюк, 2012).

Ранее нами было показано, что в годы с благоприятным сочетанием световых и гидротермических условий индекс листовой поверхности в посадках картофеля очень быстро (к 5-8 августа) достигает оптимальных величин (4-6 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>), а эффективность связывания лучистой энергии Солнца в общей сухой фитомассе растений картофеля (КПД ФАР) превышает 3%. Для хозяйственно-полезной части биологического урожая (клубней картофеля) максимальная величина КПД ФАР достигает 1.9%. Это в 1.5-2 раза больше значений данного показателя, регистрируемых в условиях средней полосы России (Костюк, 1994).

Таблица 3

**Оптимальные погодно-климатические условия формирования максимального урожая картофеля сорта Хибинский ранний на широте г. Апатиты**

Показатель	Значение показателя	Месяцы		
		Июнь	Июль	Август
Температура воздуха, °С	Оптимальное по SSA	10.8	13.9	10.2
	Оптимальное по RSA	11.9	14.9	11.6
	Среднее = 0.5(SSA+RSA)	<b>11.4</b>	<b>14.4</b>	<b>10.9</b>
	Среднее за 23 года	11.0	14.1	11.3
Сумма осадков, мм	Оптимальное по SSA	48	78	61
	Оптимальное по RSA	55	98	67
	Среднее = 0.5(SSA+RSA)	<b>52</b>	<b>88</b>	<b>64</b>
	Среднее за 23 года	47	75	55
Солнечная радиация, кВт/м <sup>2</sup> /сутки	Оптимальное по SSA	5.52	4.97	3.42
	Оптимальное по RSA	5.73	5.18	3.67
	Среднее = 0.5(SSA+RSA)	<b>5.62</b>	<b>5.08</b>	<b>3.54</b>
	Среднее за 23 года	5.34	4.80	3.49
Числа Вольфа	Оптимальное по SSA	83	83	76
	Оптимальное по RSA	102	102	102
	Среднее = 0.5(SSA+RSA)	<b>92</b>	<b>92</b>	<b>89</b>
	Среднее за 23 года	72	73	73

Примечание. 1. SSA – симплекс-оптимизация отклика; RSA – случайная оптимизация отклика.

2. 0.5(SSA+RSA) – полусумма результатов двух методов оптимизации отклика.

Резюмируя, следует сказать, что включение индекса Вольфа в список важнейших экзогенных факторов, влияющих на продуктивность культигенов, позволяет более корректно оценивать и описывать реакцию растений картофеля на вариации света,

температуры и осадков в ходе их активной вегетации в условиях Кольского Севера. Полученные нами результаты могут быть использованы в программах оптимизации технологий возделывания данной культуры за Полярным кругом.

**Список литературы**

1. Аникина С.А., Куликова Н.Т. Изучение некоторых зарубежных сортов картофеля в Заполярье // Бюллетень ВИР. - 1978. - Вып. 82. - С. 17-21.
2. Антонов А.В. Системный анализ. - М.: Высшая школа, 2004. - 454 с.
3. Власова В.А., Будин К.З. Агроклиматические условия возделывания картофеля на Крайнем Севере европейской части СССР // Бюллетень ВИР. - 1973. - Вып. 30. - С. 47-53.
4. Костюк В.И. Аккумуляция солнечной энергии картофелем в условиях Кольского полуострова // Труды по прикл. бот., ген. и сел. - 1980. - Т. 67. - Вып. 2. - С. 66-72.
5. Костюк В.И. Эффективность использования энергии солнечной радиации посадками картофеля в Хибинах // Труды по прикл. бот., ген. и сел. - 1983. - Т. 82. - С. 105-113.
6. Костюк В.И. Агроэкологические основы продуктивности картофеля на Кольском полуострове. - Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1994. - 142 с.
7. Костюк В.И. Экология культурных растений на Кольском Севере. - Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2012. - 169 с.
8. Мельничук Г.Д., Костюк В.И., Куликова Н.Т. Физиология и биохимия картофеля на Кольском Севере. - Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1997. - 162 с.
9. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ (Наука и искусство решения проблем). - Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004. - 186 с.
10. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. - М.: Изд-во "Мысль", 1976. - 367 с.
11. Яковлев Б.А. Климат Мурманской области. - Мурманск: Мурманское кн. изд-во, 1961. - 200 с.
12. STATISTICA: Обзор методов и руководство пользователя. - StatSoft. - 2001. - 220 с.