

## О ЗАВИСИМОСТИ УРОЖАЙНОСТИ КАРТОФЕЛЯ ОТ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

**Костюк В.И.,**

д.б.н., г.н.с., Полярно-альпийский ботанический сад-институт  
Кольского научного центра РАН (г. Апатиты, Россия)  
vikos47@mail.ru

**Аннотация.** Впервые выявлена зависимость между многолетними колебаниями урожайности картофеля на Кольском Севере и короткопериодическими вариациями солнечной активности. Проведен Фурье-анализ периодических свойств динамических рядов данных показателей, а также выполнен кросс-спектральный анализ сопряженности профилей их временных изменений, происходивших на протяжении 33 лет мониторинговых наблюдений.

**Ключевые слова:** Кольский Север, урожайность картофеля, солнечная активность.

## DEPENDENCE POTATO YIELD FROM VARIATIONS IN SOLAR ACTIVITY

**Kostyuk V.I.,**

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

**Annotation.** Dependence between long-term fluctuations of productivity of potatoes in the Kola North and short-period variations of solar activity is for the first time revealed. Fourier analysis of periodic properties of dynamic sequences of data of indicators is carried out, and cross-spectral association analysis of profiles of their temporary changes happening for 33 flying's of monitoring supervision is made.

**Keywords:** Kola North, potato yield, solar activity.

### Введение

Известно, что формирование урожая культурных растений находится под постоянным “контролем” такого мощного гелиогеофизического фактора, как солнечная активность, обуславливающего разнообразные проявления солнечно-биосферных связей (Harrison, 1976; Чижевский, 1976; Владимирский, 2010; Мирошниченко, 2011).

В начале двухтысячных годов было установлено, что биота Кольского полуострова, который расположен достаточно близко к географическому и магнитному полюсам Земли, испытывает хорошо выраженное широтно-зависимое воздействие данного фактора (Кашулин и др., 2001). Однако изучение влияния активности Солнца на продукционный процесс сельскохозяйственных растений в условиях Кольского Севера было начато только в последние годы (Костюк, 2012; Костюк и др., 2013).

Цель данной работы - выявление связи урожайности картофеля в данном регионе с вариациями солнечной активности, представленной в форме долговременного гелиогеофизического индекса – чисел Вольфа.

### Объекты и методы исследования

Мониторинговые наблюдения проводились в течение 33 лет (1978-2010 гг.) на Полярной опытной станции Всероссийского института растениеводства им. Н.И. Вавилова. Объектом исследования служил картофель сорта Хибинский ранний. Семенные клубни среднего размера (массой 50-70 г) проращивали на свету в течение 30-40 сут., а затем высаживали по схеме 70 • 30 см в конце мая - начале июня. Перед посадкой картофеля на делянки опытного участка вносили органические удобрения из расчета 70 т/га и нитроаммофоску – N70-90P70-90K70-90 кг д.в./га. Окончательный учет урожая клубней проводили в первой декаде сентября.

Значения чисел Вольфа (цюрихские относительные числа солнечных пятен - W) за анализируемый период наблюдений были получены из открытого интернет-источника – URL: [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar\\_data/sunspot\\_numbers](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/sunspot_numbers). Для расчетов использовали усредненные за три летних месяца значения чисел Вольфа.

Статистический анализ состава и структуры временных рядов “солнечная активность” и “урожайность картофеля”, а также оценку связи между ними выполняли с использованием программы STATISTICA 8.

### Результаты исследования

**Парная корреляция показателей.** Общая длина рассматриваемых временных рядов (33 года) номинально включает в себя три полных 11-летних цикла солнечной активности (цикла Швабе). Статистический анализ сопряженности этих рядов показал, что между урожайностью картофеля и длиннопериодическими колебаниями солнечной активности корреляция практически отсутствовала ( $r = -0.05$ ;  $P\text{-level} = 0.78$ ). Таким образом, влияние низкочастотных циклов Швабе на продуктивность картофеля в нашем случае не проявилось. Возможно, это было обусловлено тем, что по агрономическим критериям картофель является однолетней культурой и выращивается в течение одного с.-х. сезона. В такой ситуации разногодичные вариации урожайности картофеля целесообразнее увязывать не с 11-летними, а с более короткими циклами изменений солнечной активности. Часто такой подход оказывается вполне оправданным и результативным. Следует также заметить, что стандартный корреляционный анализ оказался малоэффективным для оценки завуалированных связей между этими рядами, что вызывает необходимость применения статистического инструментария с более высокой “разрешающей способностью”.

**Одномерный спектральный (Фурье) анализ структуры динамических рядов.** Основная цель данного вида анализа – определение наиболее важных (существенных) гармонических составляющих временного ряда с эндогенными циклическими компонентами (Халафян, 2008). Одномерный спектральный анализ обычно используется для получения описательных статистик стационарного временного ряда, обнаружения в нем скрытых периодических свойств и построения периодограмм, для определе-

ния оценок спектральной плотности и вклада основных частотных гармоник в спектр ряда (Суслов и др., 2005). Преобразование Фурье позволяет перевести амплитудно-временное представление в частотный спектр. В этой связи особый интерес представляет поиск частот с большими спектральными плотностями или, говоря иными словами, такие частотные области, которые состоят из совокупности близких частот и которые вносят максимальный вклад в периодическое (циклическое) поведение всего ряда (Теребиж, 1992).

Опишем последовательно с этих позиций структурные особенности рядов “солнечная активность” и “урожайность картофеля”.

Перед началом анализа в конец исходного ряда “солнечная активность” ( $n = 33$ ) добавляли один нуль (после удаления из него среднего и тренда), чтобы сделать ряд четным и сохранить в последующих расчетах его фактическую длину. Эту процедуру дополнения исходных данных нулями (пэддинг) выполняли и для урожайности картофеля. Ширину окна Хемминга для оценки спектральной плотности ряда принимали равной 5.

Ниже приводятся два графика оценки спектральной плотности (по частоте и по периоду) для показателя “солнечная активность”. На рис. 1 можно выделить два характерных пика спектральной плотности: основной - на частоте  $f = 0.09$ , и почти незаметный - на частоте  $f = 0.42$ . Первый пик (низкочастотный) отражает 11-летний цикл солнечной активности, а второй (высокочастотный) – периодичность 2.4 года (рис. 2). Биологическая значимость этой высокочастотной периодичности обсуждается в литературе чрезвычайно редко, а потому она представляет особый интерес в плане оценки ее потенциального влияния на урожайность картофеля.

На спектрограммах динамического ряда “урожайность картофеля” (рис. 3 и 4) выделяются четыре характерных пика - три минорных и один доминантный.

Первый – это низкочастотный пик ( $f = 0.06$ ), имеющий стереотипный 16.5-летний период проявления. Вторая характерная точка на данных графи-

ках (смежная с первым пиком) - приурочена к частоте  $f = 0.09$  и отражает 11-летний цикл солнечной активности. Эти две компоненты временного ряда имеют сравнительно небольшие по абсолютной величине и достаточно близкие значения спектральной плотности и не оказывали, очевидно, заметного влияния на многолетние колебания урожайности картофеля.

Третий пик характеризуется более высокой частотой -  $f = 0.27$  и повторяется через каждые 3.7 года. Однако наибольший теоретико-прикладной интерес представляет мощная высокочастотная компонента ( $f = 0.42$ ) с периодом 2.4 года. Она совпадает с одной из минорных частотных компонент спектра солнечной активности (периодичность 2.4 года), о которой уже упоминалось ранее.

Тесная сопряженность изменений активности Солнца и вариаций урожайности картофеля с периодичностью 2.4 года является, вероятно, не случайной и отражает одну из любопытных граней “универсального” влияния рассматриваемого гелиогеофизического фактора на природную среду.

Воздействие этой высокочастотной компоненты активности Солнца (с периодом приблизительно 2.5 года) проецируется не только на биоту, но и на абиотическую составляющую среды. Установлено, например, что с достаточно близкой периодичностью происходят оползни и обвалы в Альпах, на территориях Западной и Восточной Европы (Атлас..., 1998, с. 143-144), осуществляются колебания среднегодовых уровней Черного и Азовского морей (Атлас..., 1998, с. 216-227). Сравнительно недавно, на основе спектрального анализа временных рядов максимального стока реки Днестр (в периоды весенних половодий), также был выделен устойчивый цикл продолжительностью 2.2-2.5 года (Мельник, 2012).

**Кросс-спектральный анализ связи динамических рядов.** Этот подход расширяет рамки одномерного анализа Фурье и позволяет одновременно анализировать взаимосвязь спектров двух динамических рядов. Данный вид анализа определяет наличие или отсутствие существенных гармонических составляющих в исследованных частотных диапазонах и дает возможность оценивать тесноту связи

между временными рядами именно с этих позиций (Дроздов и др., 1989; Айвазян, Мхитарян, 2001).

Итоговая таблица результатов кросс-спектрального анализа обычно включает следующие основные статистики: кросс-периодограмму, кросс-плотность, квадратурную плотность, кросс-амплитуду, квадрат когерентности, усиление, фазовый сдвиг (Statistica, 2001). Ключевыми в данном наборе статистик являются оценки когерентности, усиления и фазового сдвига (Дроздов и др., 1989; Горчаков, Половников, 1995).

*Коэффициент когерентности* представляет собой квадрат корреляции между циклическими компонентами двух рядов соответствующей частоты. Данный показатель отражает линейную связь двух рядов дифференцированно по частотам. Когерентность принимает значения в промежутке от 0 до 1.

*Коэффициент усиления (выигрыша)* позволяет получить информацию о том, на каких частотах наблюдается синхронное и соответствующее по величине изменение мощности в двух анализируемых временных рядах.

*Фазовый сдвиг (спектр)* дает представление о том, насколько каждая частотная компонента одного ряда опережает частотные компоненты другого ряда или отстает от них.

Оценим теперь с помощью данного статистического подхода связь между солнечной активностью и урожайностью картофеля (таблица). Полученные результаты показали, что наиболее высокие значения кросс-плотности и кросс-амплитуды относятся к следующим частотам:  $f = 0.09$  (период 11.0 года),  $f = 0.18$  (период 5.5 года),  $f = 0.21$  (период 4.7 года),  $f = 0.27$  (период 3.7 года),  $f = 0.36$  (период 2.8 года),  $f = 0.42$  (период 2.4 года) и  $f = 0.48$  (период 2.1 года). В этом списке по значениям кросс-плотности и кросс-амплитуды особенно выделяются две доминирующие частоты -  $f = 0.09$  (известный 11-летний цикл Швабе) и  $f = 0.48$  (широко обсуждаемый в последние годы квазидвухлетний цикл изменений солнечной активности – см., например, McIntosh et al., 2015).

Максимальная когерентность рядов ( $> 0.90$ ) проявилась на следующих частотах их взаимного спек-

ра:  $f = 0.48$  (период 2.1 года),  $f = 0.42$  (период 2.4 года),  $f = 0.33$  (период 3.0 года),  $f = 0.27$  (период 3.7 года),  $f = 0.21$  (период 4.7 года) и  $f = 0.18$  (период 5.5 года). Любопытно, что сопряженность рядов на частоте  $f = 0.09$  (период 11.0 года), оцениваемая по величине коэффициента когерентности, оказалась выражена достаточно умеренно (0.72).

Таким образом, для уточнения и конкретизации общей картины спектрального анализа необходимо подробнее рассмотреть короткопериодическую часть взаимного спектра двух динамических рядов – от 2.1 до 5.5 года. Картофель, как выяснилось, обладает непродолжительной модификационной “памятью”, зависящей (как и у других культурогенов) от “поточных” (климат, метеоусловия, биота), “неподвижных” (ландшафт, рельеф) и антропогенных (агроэкология) факторов.

В этом временном интервале самые большие значения коэффициента усиления (выигрыша) для ряда “урожайность картофеля” в зависимости от вариаций активности Солнца (Gain values  $Y$  over  $X$ ) наблюдались на когерентных частотах с периодичностью 2.4, 2.8, 3.0, 4.7 и 5.5 года. Необходимо заметить, что периодичность 5.5 года в колебаниях урожайности картофеля совпадает не только с полупериодом 11-летнего цикла солнечной активности, но и с одним из основных циклов вариаций планетарного амплитудного индекса геомагнитной активности  $Aa$ , который составляет приблизительно 5.5 года (Заболотная, 2007).

Из приведенной таблицы видно также, что по мере снижения частоты (увеличения периода) значения фазового сдвига между рассматриваемыми рядами несколько уменьшались. Наибольшая согла-

сованность между рядами, оцениваемая по значениям фазового спектра, наблюдалась на частоте  $f = 0.18$  (период 5.5 года).

### Заключение

На основе спектрального анализа временных рядов установлено, что многолетние колебания урожайности картофеля на Кольском Севере в значительной мере связаны с изменениями активности Солнца. На вариации урожайности этой культуры по годам наиболее заметно влияют высокочастотные компоненты спектра солнечной активности с цикличностью 2...5 лет. Внутри этого диапазона отчетливо выделяется цикл в 2.4 года, характеризующийся максимальным “фитотропным” эффектом. Проявление этого эффекта обусловлено по меньшей мере двумя основными причинами: 1) избирательным “захватом частоты” на данной гармонике солнечной активности; 2) опосредованным влиянием частоты  $f = 0.42$  (период 2.4 года) на урожайность картофеля за счет специфической “настройки” комплекса метеорологических и почвенно-климатических условий. Показано, например, что наиболее заметные межгодовые климатические колебания, кардинально влияющие на продукционный процесс растений, также происходят с периодичностью в 2.4 года (Монин, Сонечкин, 2005).

Полученные нами результаты дают все основания считать, что для корректного описания сценариев эвентуальных изменений урожайности картофеля на Севере в кратко- и среднесрочной перспективе необходимо учитывать короткопериодические вариации активности Солнца. В противном случае, доля неопределенности и масштабы ошибок в подобных прогнозах будут очень велики.

Таблица

**Результаты кросс-спектрального анализа двух сопряженных рядов динамики – чисел Вольфа (X) и урожайности картофеля (Y) (ширина окна Хемминга была принята равной 3)**

№ п/п	Частота (f)	Период (годы)	Плотность X	Плотность Y	Кросс-плотн.	Кросс-ампл.	Квадр. когер.	Выигрыш	Сдвиг фазы
0	0.00		469	0.01	2.0	2.0	0.79	189.4	0.00

№ п/п	Частота (f)	Период (годы)	Плотность X	Плотность Y	Кросс-плотн.	Кросс-ампл.	Квадр. когер.	Выигрыш	Сдвиг фазы
1	0.03	33.0	3033	0.13	14.5	16.3	0.68	126.1	-0.47
2	0.06	16.5	5168	0.84	37.0	41.8	0.40	49.9	-0.48
3	0.09	<b>11.0</b>	<b>46945</b>	0.37	<b>93.1</b>	<b>111.5</b>	0.72	<b>301.3</b>	-0.58
4	0.12	8.3	14015	0.46	8.3	59.8	0.56	130.2	1.43
5	0.15	6.6	1250	0.38	7.7	8.4	0.15	22.2	-0.42
6	0.18	<b>5.5</b>	926	0.46	<b>20.1</b>	<b>20.1</b>	<b>0.94</b>	<b>43.4</b>	<b>-0.05</b>
7	0.21	<b>4.7</b>	1239	1.16	<b>36.9</b>	37.7	<b>0.99</b>	<b>32.5</b>	<b>-0.20</b>
8	0.24	4.1	208	0.25	5.0	5.4	0.54	21.1	-0.34
9	0.27	<b>3.7</b>	292	1.78	9.9	<b>21.6</b>	<b>0.90</b>	12.1	-1.09
10	0.30	3.3	197	0.65	5.5	8.1	0.51	12.5	0.82
11	0.33	<b>3.0</b>	701	0.51	6.3	18.1	<b>0.92</b>	<b>35.6</b>	1.22
12	0.36	<b>2.8</b>	622	1.55	11.3	<b>28.5</b>	0.84	<b>18.4</b>	1.16
13	0.39	2.5	159	2.62	-5.7	5.8	0.08	2.2	-3.03
14	0.42	<b>2.4</b>	<b>1315</b>	3.65	<b>-64.1</b>	<b>65.8</b>	<b>0.90</b>	<b>18.0</b>	2.91
15	0.45	2.2	183	9.50	10.1	13.0	0.10	1.4	-0.69
16	0.48	<b>2.1</b>	429	<b>90.47</b>	<b>194.9</b>	<b>194.9</b>	<b>0.98</b>	2.2	0.00

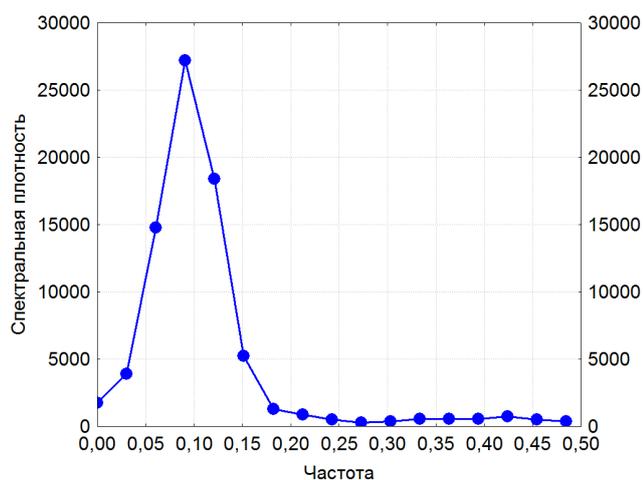


Рис. 1. График спектральной плотности показателя "солнечная активность" по частоте

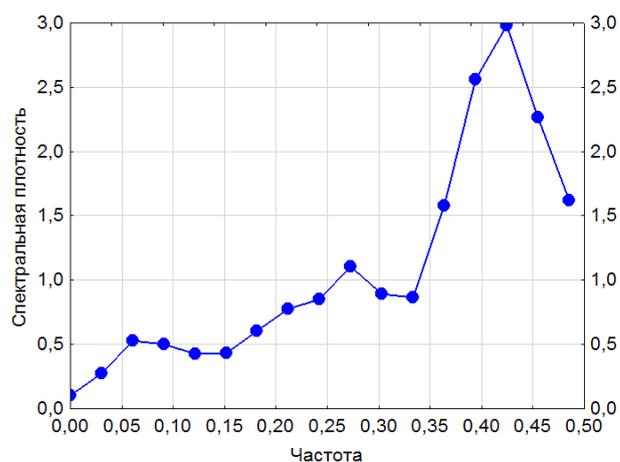


Рис. 2. График спектральной плотности показателя "солнечная активность" по периоду

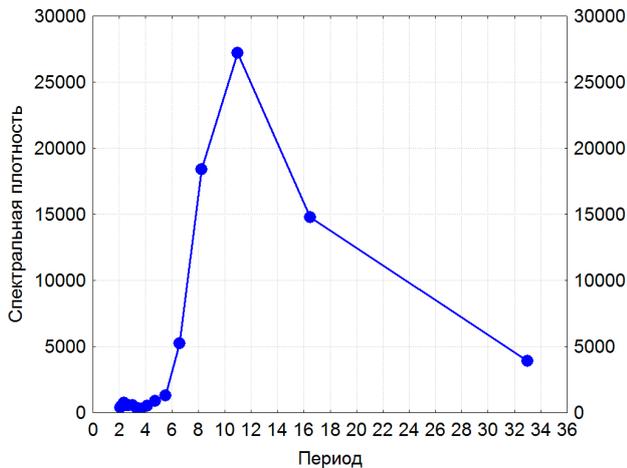


Рис. 3. График спектральной плотности показателя "урожайность картофеля" по частоте

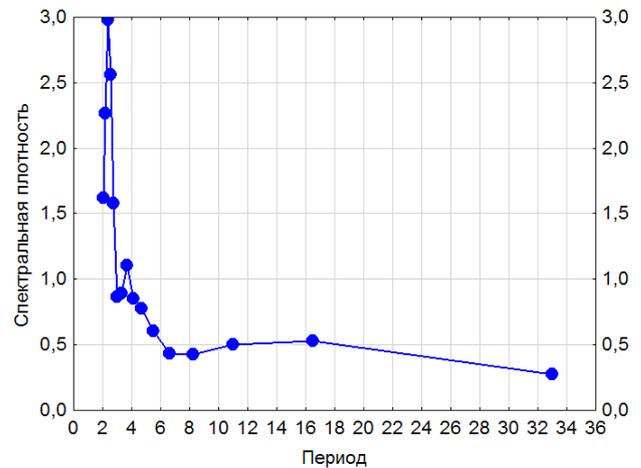


Рис. 4. График спектральной плотности показателя "урожайность картофеля" по периоду

### Список литературы

1. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика. Основы эконометрики. В 2-х томах. - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. - Т. 1. - 656 с., - Т. 2. - 432 с.
2. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Том 2. Циклическая динамика в природе и обществе. - М.: Научный мир, 1998. - 432 с.
3. Владимирский Б.М. Работы А.Л. Чижевского по солнечно-земным связям. Гелиобиология в канун XXI века – итоги, проблемы, перспективы // Биофизика. - 1998. - Т. 43. - Вып. 4. - С. 566-570.
4. Горчаков А.А., Половников В.А. Финансовая математика. - М.: ВЗФЭИ, 1995. - 247 с.
5. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. и др. Климатология. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - 567 с.
6. Заболотная Н.А. Индексы геомагнитной активности. Справочное пособие. - М.: Изд-во ЛКИ, 2007. - 88 с.
7. Кашулин П.А., Ролдугин В.К., Жибоедов П.М., Костюк В.И. Исследование биологической роли гелиогеофизических факторов в Субарктике на примере выживания растений // Вековые изменения морских экосистем Арктики. Климат, морской перигляциал, биопродуктивность. - Апатиты. Изд-во Кольского научного центра РАН, 2001. - С. 136-145.
8. Костюк В.И. Экология культурных растений на Кольском Севере. - Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2012. - 169 с.
9. Костюк В.И., Травина С.Н., Вихман М.И. Влияние солнечной активности, инсоляции, температуры воздуха и атмосферных осадков на продуктивность культурных растений в условиях Кольского Севера. - Апатиты. Изд-во Кольского научного центра РАН, 2013. - 79 с.
10. Мельник С.В. Анализ временных рядов стока на постах верхнего и среднего Днестра // Ученые записки Таврического университета им. В.И. Вернадского. Серия "География". - 2012. - Т. 25. - №2. - С. 74-80.
11. Мирошниченко Л.И. Физика Солнца и солнечно-земных связей. - М.: Университетская книга, 2011. - 174 с.
12. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы. - М.: Наука, 2005. - 191 с.
13. Суслов В.И., Ибрагимов Н.М., Талышева Л.П., Цыплаков А.А. Эконометрия. - Новосибирск: Изд-во Сибирского Отделения РАН, 2005. - 744 с.

14. Теребиж В.Ю. Анализ временных рядов в астрофизике. - М.: Наука, 1992. - 392 с.
15. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. – М.: Бином-Пресс, 2008. - 512 с.
16. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. - М.: Изд-во Мысль, 1976. - 367 с.
17. Harrison V.L. Do sunspot cycles affect crop yields? Economic Research Service. U.S. Department of Agriculture. Agricultural Economic Report. No. 327. - Washington. 1976. - 23 p.
18. McIntosh S.W., Leamon R.J., Krista L.D. et al. The solar magnetic activity band interaction and instabilities that shape quasi-periodic variability // Nature Communications. - 2015. - 6:6491. - Doi: 10.1038/ncomms7491.
19. STATISTICA: Обзор методов и руководство пользователя. - StatSoft, 2001. - 220 с.