



*Двенадцатая Всероссийская открытая конференция  
«Современные проблемы дистанционного зондирования  
Земли из космоса»  
Москва, Институт космических исследований РАН,  
10 - 14 ноября 2014 г.*

## **ПРОГНОЗ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ НА ОСНОВЕ МНОГОЛЕТНИХ РЯДОВ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ( на примере Казахстана)**

1)Спивак Л.Ф., 2)Батырбаева М.Ж, 2)Витковская И.С. 2)Кауазов А.

1) Международный университет природы, общества и человека «Дубна», РФ

2) Национальный центр космических исследований и технологий, Казахстан

- Прогнозные оценки урожайности зерновых традиционно представляют большой практический интерес, как для стран производителей, так и для потенциальных потребителей.
- В России и Казахстане основные площади зерновых возделываются в условиях неполивного земледелия и урожайность сильно зависит от погоды. Для наших стран проблема прогноза урожайности чрезвычайно актуальна.

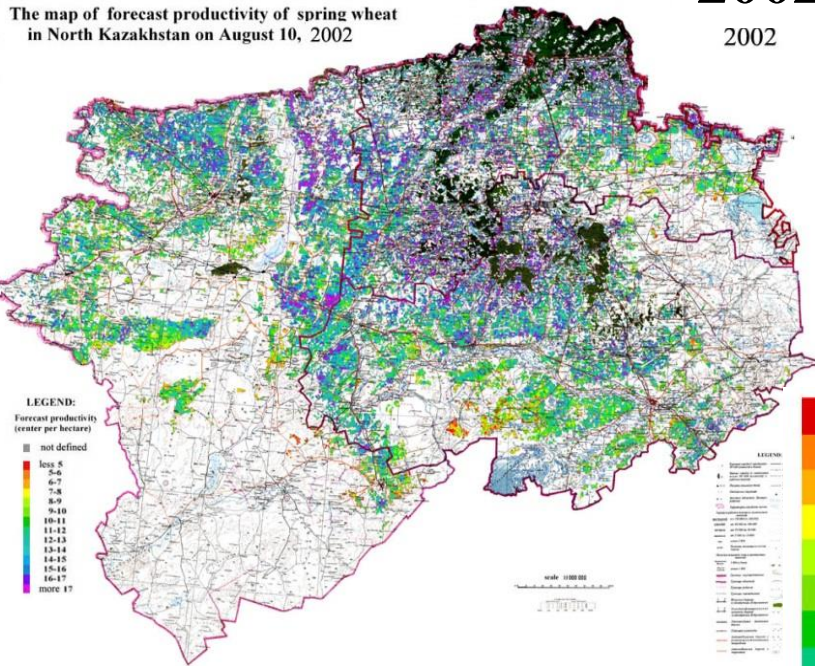
# УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ В СЕВЕРНОМ КАЗАХСТАНЕ

В Казахстане посевы зерновых занимают около 15 млн. га и особенно часто страдают от засух. Урожайность в благоприятные и неблагоприятные годы различается в 2-3 раза.

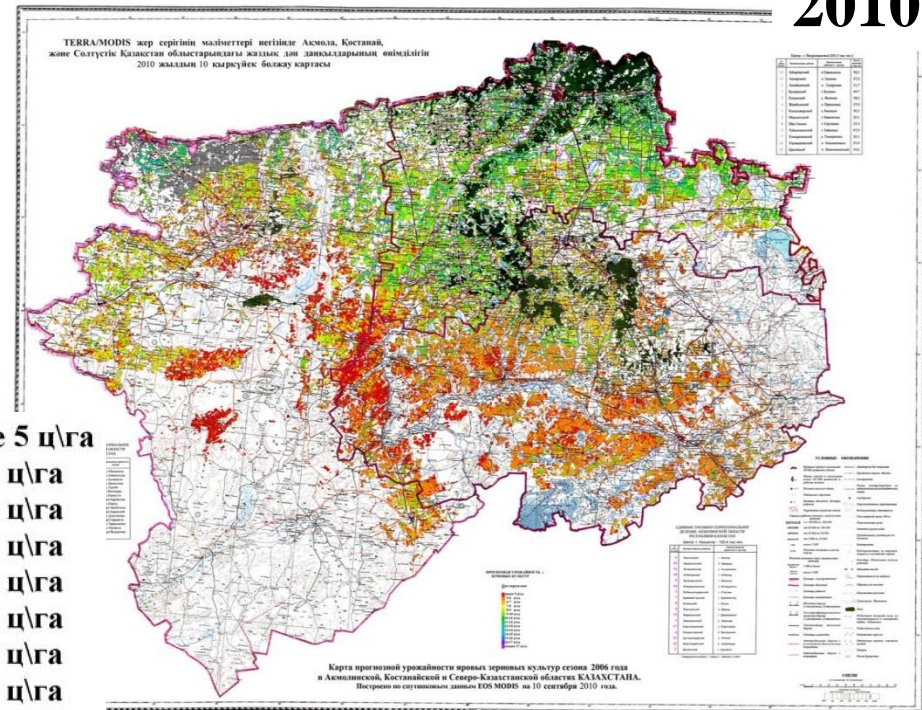
2002

2002

The map of forecast productivity of spring wheat in North Kazakhstan on August 10, 2002



2010



менее 5 ц\га  
5-6 ц\га  
6-7 ц\га  
7-8 ц\га  
8-9 ц\га  
9-10 ц\га  
10-11 ц\га  
11-12 ц\га  
12-13 ц\га  
13-14 ц\га  
14-15 ц\га  
15-16 ц\га  
16-17 ц\га  
свыше 17 ц\г

- В последнее десятилетие засухи различной интенсивности и продолжительности регистрируются практически ежегодно и наносят значительный ущерб экономике республики.  
К сожалению задача прогноза и оценки рисков, связанных с потерями урожая из-за неблагоприятных погодных условий, пока не имеет удовлетворительного решения.
- Ниже презентована методика прогноза урожайности зерновых, разработанная в АО НЦКИТ НКА РК.  
Методика основана на использовании многолетних рядов вегетационных индексов, построенных по данным ДЗЗ.

# Постановка задачи прогноза

- В общем случае постановка задачи прогноза должна определять :
  - вид культуры;
  - территорию, на которую делается прогноз;
  - срока представления прогноза.
  - требования к точности прогноза.

- С учетом специфики Казахстана в дальнейшем будем говорить только о прогнозе урожайности яровых зерновых культур.
- В территориальном аспекте ограничимся масштабным уровнем «область – районы».
- В зависимости от срока представления будем различать ранний прогноз, который делают до посева, среднесрочный – за один-два месяца до уборки и краткосрочный – за одну-две недели декада до уборки.
- Чем раньше получен прогноз, тем выше его ценность. Ранние прогнозы позволяют заблаговременно оценить риски, связанные с потерями урожая из-за неблагоприятных погодных условий, и принять меры к их снижению.



- Точность прогноза определяет величину допустимой ошибки или погрешности прогноза.
- Принято считать, что величина погрешности прямо пропорциональна сроку представления прогноза (чем раньше сделан прогноз, тем больше ошибка) и обратно пропорциональна размеру территории (чем больше территория, тем меньше ошибка).
- Если для уровня области хорошим показателем является погрешность в 7 - 10 %, то для района погрешность в 15% следует считать удовлетворительной.

# ОСНОВЫ МЕТОДИКИ

- Любой прогноз основывается на истории. Для корректного прогноза нужно иметь репрезентативный **временной ряд**, объективно отражающий историю изменения значений прогнозируемого параметра. В процессе анализа ряда ищутся закономерности и строятся модели, описывающие динамику значений прогнозируемого параметра в предшествующие периоды, которые и используются для прогноза.
- Временной шаг ряда должен соответствовать временному шагу прогноза. В частности, для раннего прогноза урожайности нужен временной ряд с **годовым шагом**, а для краткосрочного – с **декадным**.



- В общем случае урожайность в пределах конкретной территории определяется тремя группами факторов и может быть рассчитана по формуле:  
$$Y = F(\text{Pr}, \text{Th}, \text{Mt}) = f_1(\text{Pr}) + f_2(\text{Th}) \pm f_3(\text{Mt})$$

где:

- Pr – факторы, определяющие естественную продуктивность земель;
- Th - факторы, связанные с технологией возделывания (семена, обработка и удобрение почвы, даты сева и т.п.);
- Mt – факторы, зависящие от метеоусловий вегетационного сезона.

Каждая из этих групп факторов вносит свой вклад в итоговую урожайность. Трудности прогноза связаны с различной динамикой перечисленных факторов.

- Принято считать, что:
  - факторы группы Pr являются наиболее стабильными и определяют базовый уровень урожайности. На ограниченном интервале времени природные условия можно считать неизменными т.е.  $f_1(\text{Pr}) \approx \text{const}$ ;
  - тенденция роста урожайности обусловлена постоянным развитием технологий возделывания, при этом уравнение тренда  $f_2(\text{Th})$  имеет линейный вид;
  - $f_3(\text{Mt})$  определяет колебания урожайности, связанные с вариациями погодных условий, которые носят случайный характер, т.е. их можно прогнозировать лишь с определенной вероятностью.

- Если нам задан временной ряд годовых урожайностей  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , то прогнозное значение можно рассчитать по формуле  $Y_{п_{n+1}} = Y_{т_{n+1}} \pm \Delta Y_{n+1}$

где

$Y_{т_{n+1}}$  – прогнозное значение урожайности, рассчитанное с учетом тренда

$\Delta Y$  – вариации урожайности, связанные с метеоусловиями. Обычно

$$\Delta Y = (\sum (Y_i - Y_{т_i})^2 / n)^{1/2} \quad i=1, \dots, n$$

**Отметим, что прогнозируется не конкретное число, а интервал.**

В зонах без рискованного земледелия, метеоусловия практически не влияют на урожайность, т.е.  $f_3(Mt) \approx \text{const}$ ,  $\Delta Y \approx 0$ . Динамика такого ряда полностью описывается технологическим трендом, который можно считать линейным.

В случае, когда технологии практически не изменяются ( $f_2(Th) \approx \text{const}$ ), прогноз урожайности полностью определяется  $Mt$  и фактически сводится к прогнозу сезонных метеоусловий

$$Y_{п_{n+1}} = Y_{ср} \pm \Delta Y_{n+1}$$

# Прогноз на основе вероятностей

- На практике, обычно, достаточно правильно предсказать будут ли погодные условия благоприятными, средними (в пределах нормы) или не благоприятными.
- При известной априорной вероятности различных погодных условий прогнозируемая урожайность рассчитывается по формулам:

$$Y_{п} = Y_{ср} \pm \Delta Y$$

$$Y_{ср} = r_1 Y_1 + r_2 Y_2 + r_3 Y_3,$$

$$r_1 + r_2 + r_3 = 1$$

где

- $r_1$  – априорная вероятность благоприятных погодных условий;
- $Y_1$  - средняя урожайность при благоприятных погодных условиях;
- $r_2$  – априорная вероятность «нормальных» погодных условий;
- $Y_2$  - средняя урожайность при «нормальных» погодных условиях;
- $r_3$  – априорная вероятность неблагоприятных погодных условий (засухи);
- $Y_3$  - средняя урожайность при неблагоприятных погодных условиях.

Если вероятности (частота) и величина колебаний урожайности в благоприятные и неблагоприятные годы существенно различаются, то ожидаемый диапазон (интервал) можно определить следующим образом:

$$[Y_{\text{ср}} - \Lambda^- ; Y_{\text{ср}} + \Lambda^+ ] ; \Lambda^+ = r1 \times \delta^+ ; \Lambda^- = r3 \times \delta^-$$

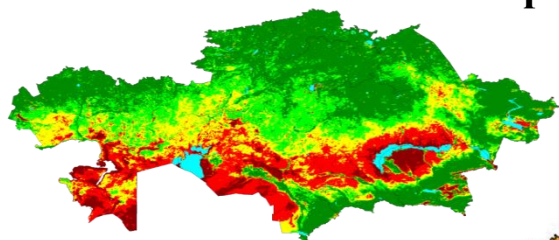
где:  $\delta^+$  и  $\delta^-$  - средние многолетние колебания увеличения и уменьшения урожайности взвешенные с учетом вероятности благоприятных и неблагоприятных погодных условий.

В принципе, вероятностную модель прогноза можно использовать в случае когда  $f_2(\text{Th}) \neq \text{const}$ , если предварительно искусственно «очистить» временной ряд от влияния технологий.

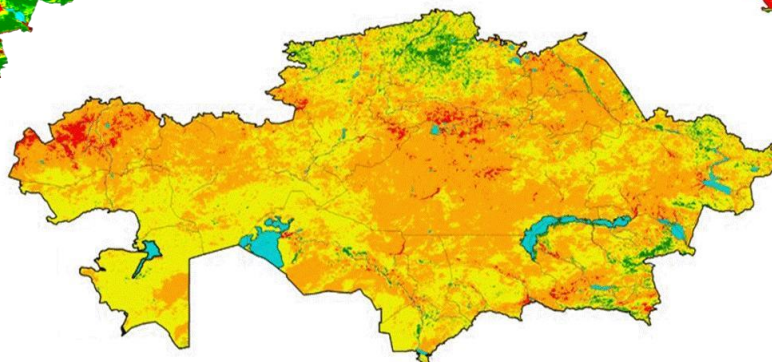
- К сожалению, соотношение благоприятных (Б), «нормальных» (Н) и не благоприятных (НБ) лет в различные периоды меняется.
- Во времена Советского Союза популярной была формула  $C(5) = 2НБ + 2Н + 1Б$
- Есть основания считать, что эта статистика в современных условиях не репрезентативна и требует уточнения с учетом последствий глобального изменения климата.
- В настоящее время единственным достоверным источником информации для актуализации статистических показателей и пространственно-временных закономерностей изменения погодных условий на территории Казахстана являются данные ДЗЗ.
- В Казахстане регулярный космический мониторинг состояния растительного покрова ведется с 2000 года. Основой для оценки сезонной и многолетней динамики продуктивности растительного покрова служит попиксельная база ежедневных значений нормализованного дифференциального вегетационного индекса (NDVI), которая формируется по данным AVHRR NOAA и MODIS Terra на всю территорию Казахстана
- По оценкам, полученным в результате анализа данных ДЗЗ и подтвержденных наземными метеонаблюдениями, в последние десятилетия на территории Казахстана наблюдается повсеместное повышение средней годовой и сезонной температуры приземного воздуха, особенно в летние месяцы. Климатические изменения способствуют расширению зон распространения и увеличению частоты засух, что в свою очередь отрицательно влияет на урожайность сельскохозяйственных культур.

# ОЦЕНКА МЕЖСЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА

Зоны различной продуктивности растительности

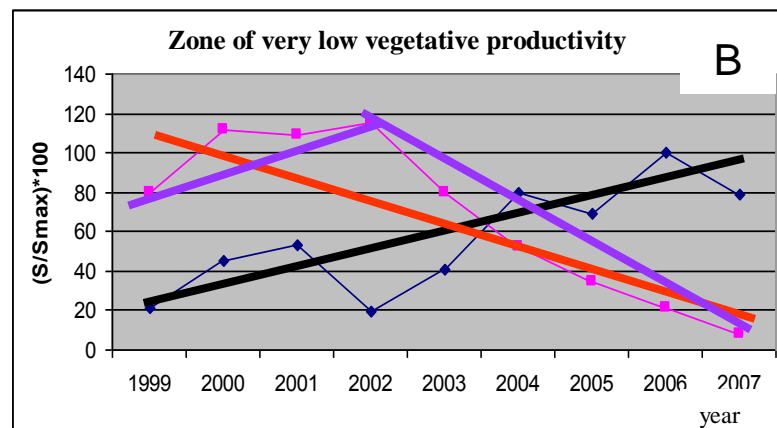
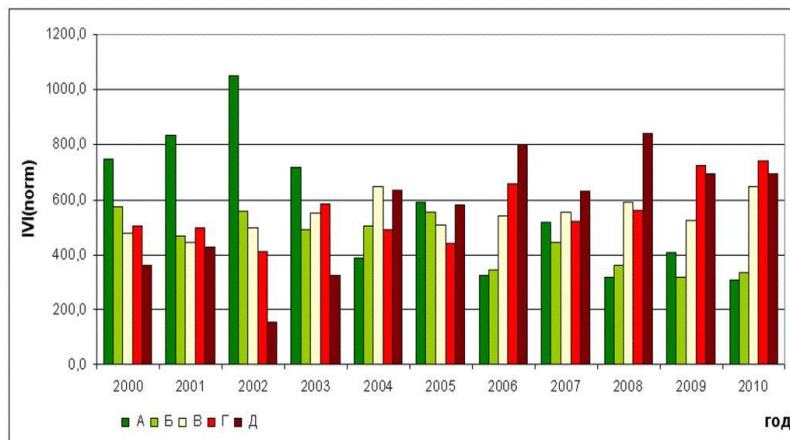


2002



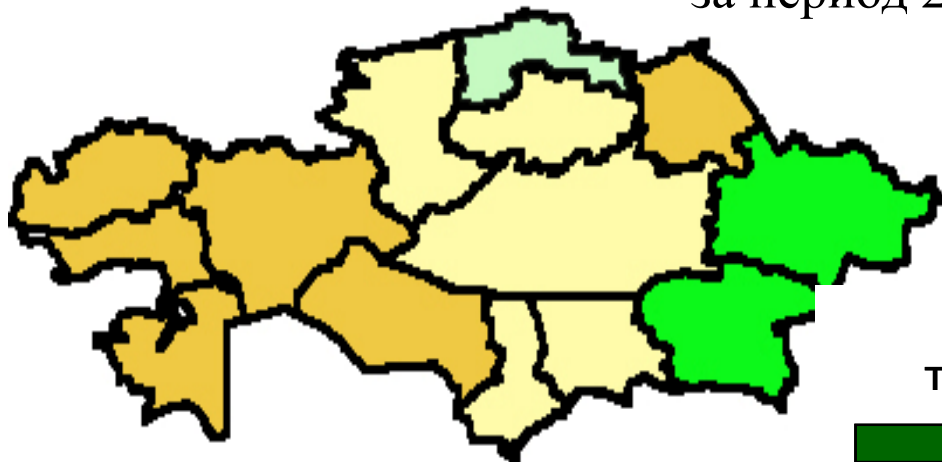
2008

Изменение продуктивности растительности

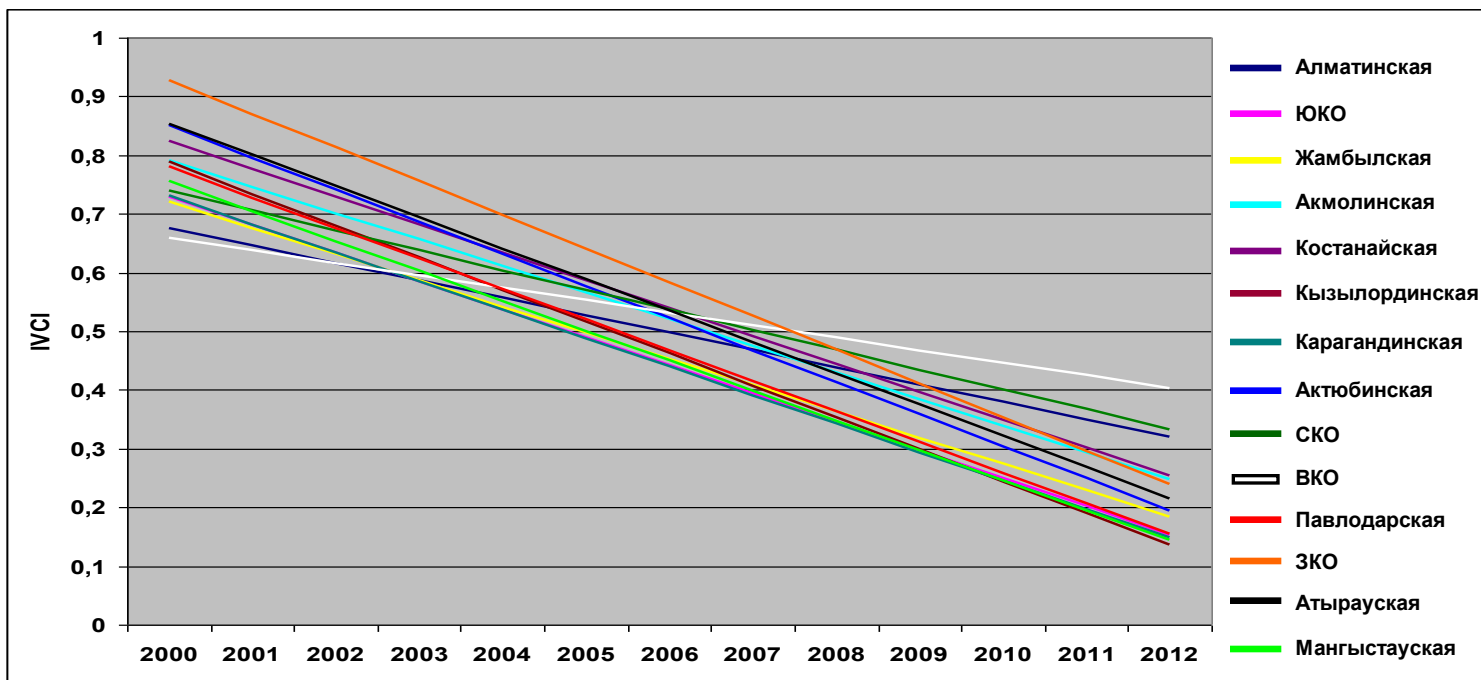
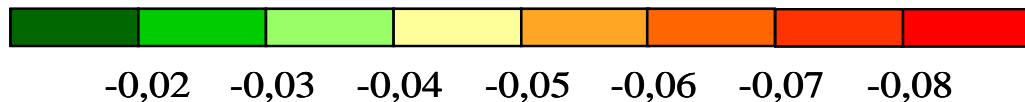


Динамика площадей зон различной продуктивности растительности

# Районирование областей Казахстана по значениям коэффициента линейного тренда динамики снижения продуктивности растительного покрова за период 2000-2012 гг.



Коэффициенты  
тренда распределения IVCI (2002-2012)





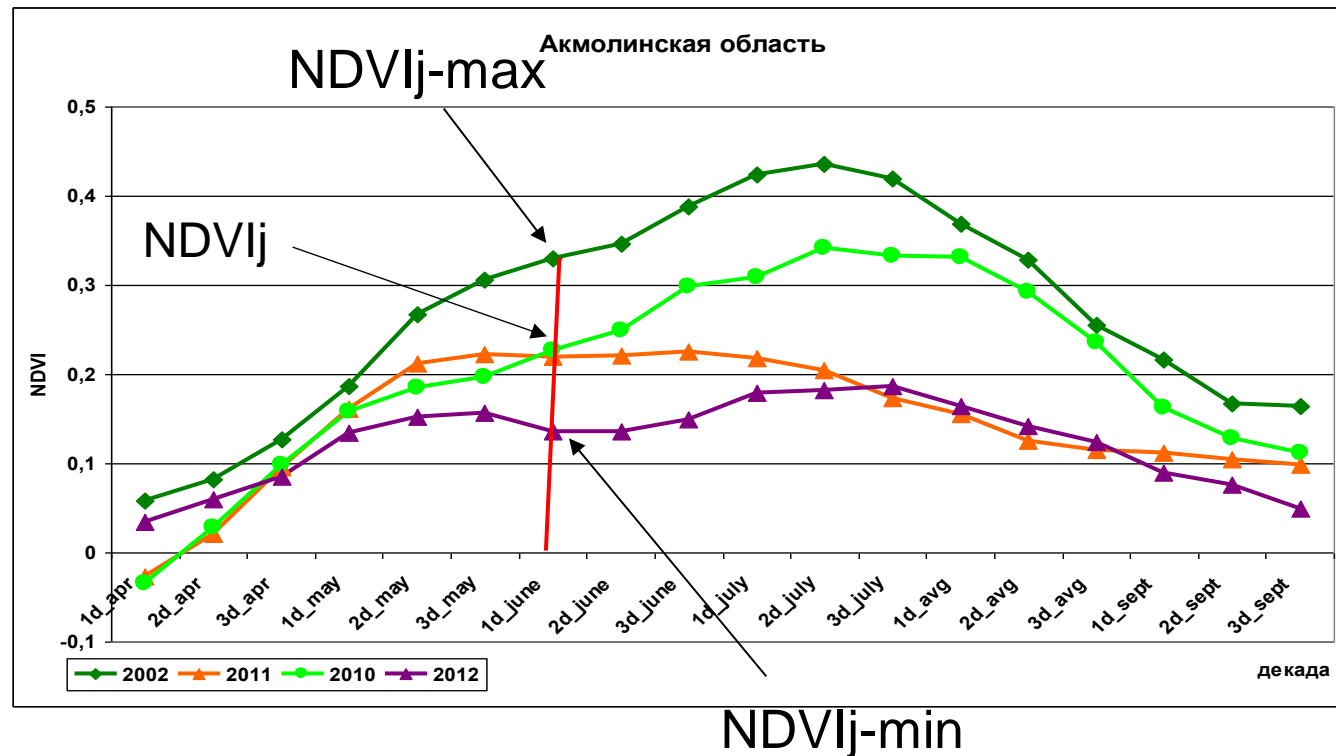
- Для характеристики состояния растительности по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса применяются специальные комплексные параметры, так называемые, индексы вегетации.
- Следует отметить, что при использовании данных ДЗЗ мы опираемся на косвенные оценки факторов урожайности. В частности, по данным ДЗЗ оцениваются не собственно метеорологические параметры (осадки и температура), а результаты воздействия погодных условий на состояние растительности.

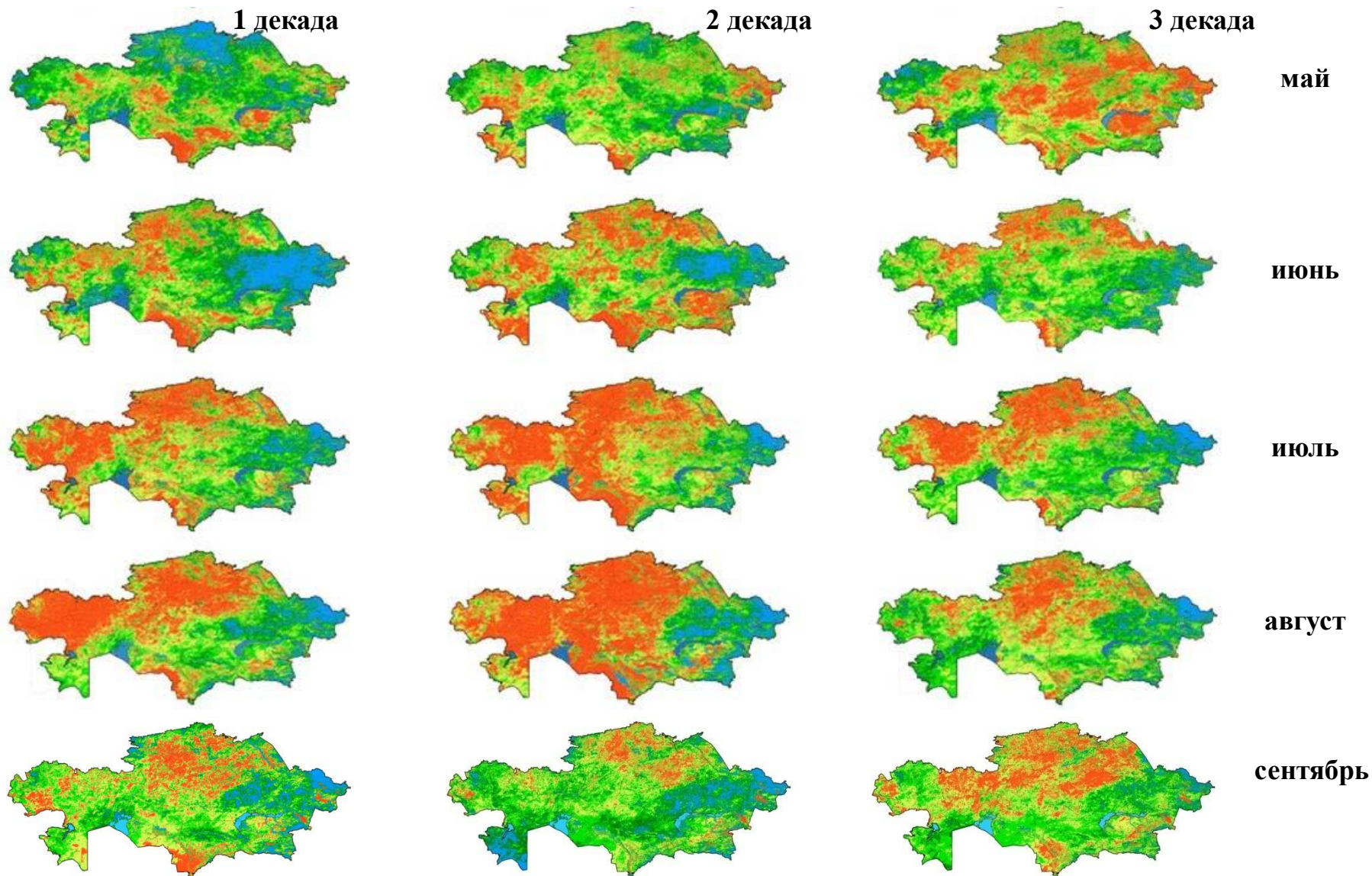
Вегетационные индексы, которые используются для решения задач космического мониторинга сельскохозяйственного производства в Казахстане.

Наименование	Формула расчета	Временной шаг	Комментарий
<b>NDVI</b>	$NDVI = (NIR-RED)/(NIR+RED)$	сутки	<b>Распознавание и картирование растительного покрова и посевов с/х культур</b>
<b>NDVI-композит</b>	$NDVI_j = \max_i NDVI_i$ i – номер дня в декаде j - номер декады в сезоне	декада	
<b>VCI</b>	$VCI_j = 100 (NDVI_j - NDVI_{j-min}) / (NDVI_{j-max} - NDVI_{j-min})$ NDVI <sub>j-max</sub> и NDVI <sub>j-min</sub> – максимальное/ минимальное значение NDVI <sub>j</sub> за весь период мониторинга	декада	<b>Оценка влияния погодных условий на состояние растительности в течение вегетационного сезона</b>
<b>IVI</b>	$IVI_t = \sum_j NDVI_j$ j- номер декады в сезоне (от n1 до n2) t – номер сезона	год	<b>Анализ межсезонных вариаций продуктивности растительности</b>
<b>IVCI</b>	$IVCI_t = 100 (IVI_t - IVI_{min}) / (IVI_{max} - IVI_{min})$ t – номер сезона	год	<b>Анализ межсезонных вариаций влияния погодных условий на продуктивность растительности</b>

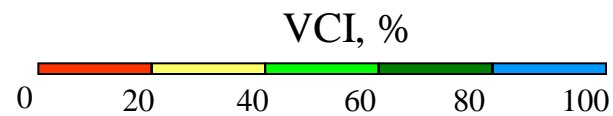
# Индекс условий вегетации VCI (Vegetation Condition Index)

- VCI отражают влияние погодных условий на текущее состояние растительности и рассчитывается по формуле
- $VCI_j = 100 (NDVI_j - NDVI_{j-min}) / (NDVI_{j-max} - NDVI_{j-min})$   
NDVI<sub>j</sub> – значение NDVI за j-ую декаду  
NDVI<sub>j-max</sub> и NDVI<sub>j-min</sub> – максимальное и минимальное значение NDVI в j - декаду за весь период мониторинга
- Значения VCI выше 65 % свидетельствуют о хорошем текущем состоянии растительности и благоприятных погодных условиях, значения менее 35% говорят о стрессовых погодных условиях. VCI <30% является индикатором засухи.





**Распределение значений декадных VCI/NOAA в вегетационном сезоне 2010 года**



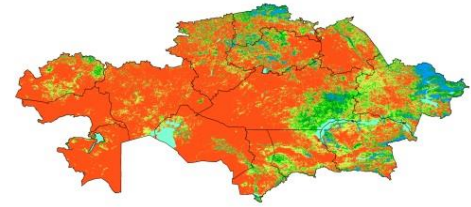
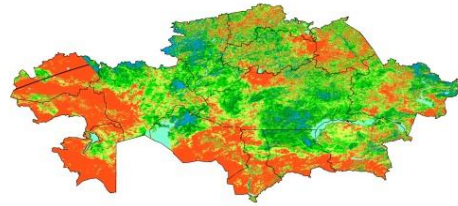
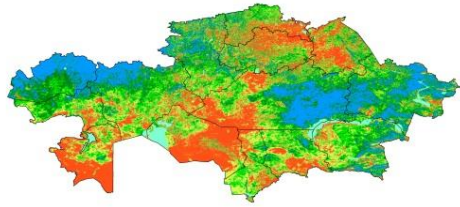


# Динамика декадных значений VCI за 2012 г.

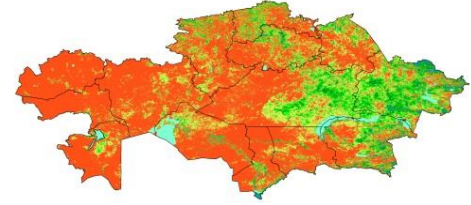
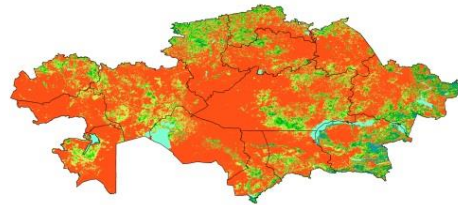
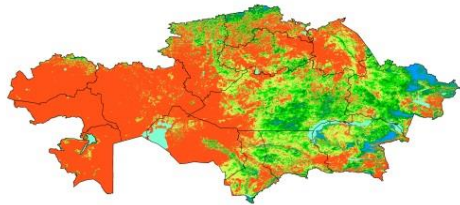
1 decade

2 decade

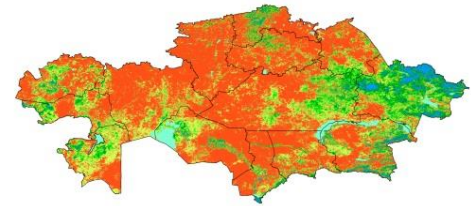
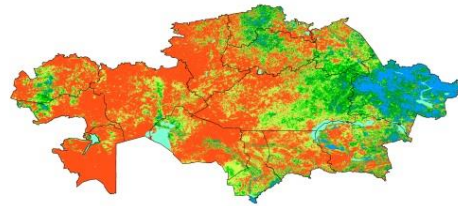
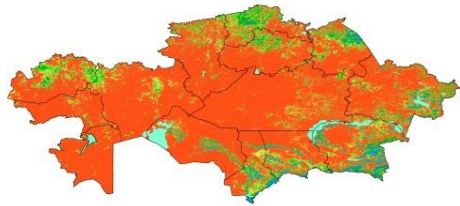
3 decade



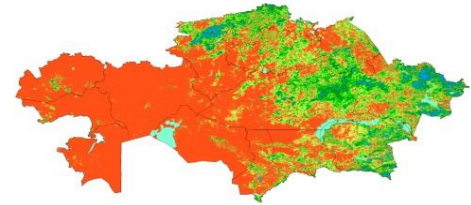
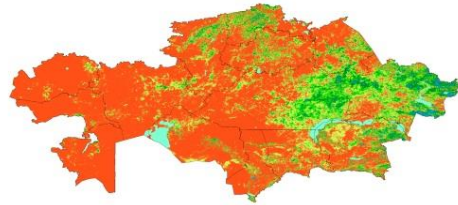
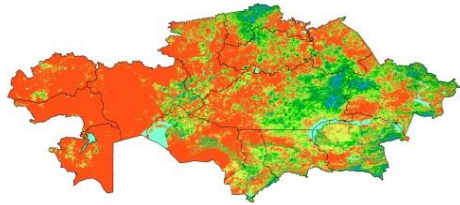
may



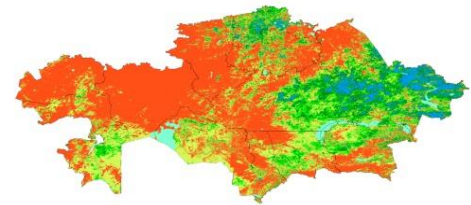
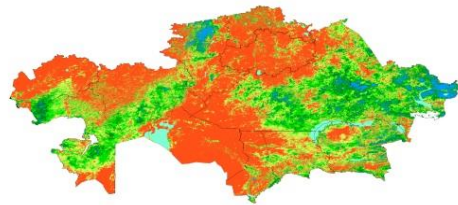
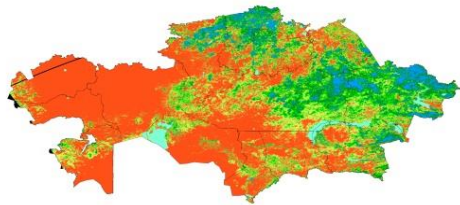
june



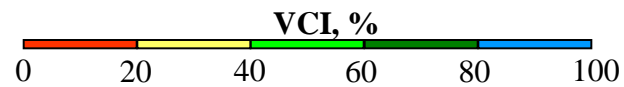
july



august



september



## Интегральные вегетационные индексы

Декадные значения NDVI и VCI достаточно хорошо описывают сезонную динамику растительного покрова, но для межсезонного анализа лучше использовать интегральные индексы IVI и IVCI. Они упрощают процедуры анализа и позволяют получить более стабильные оценки.

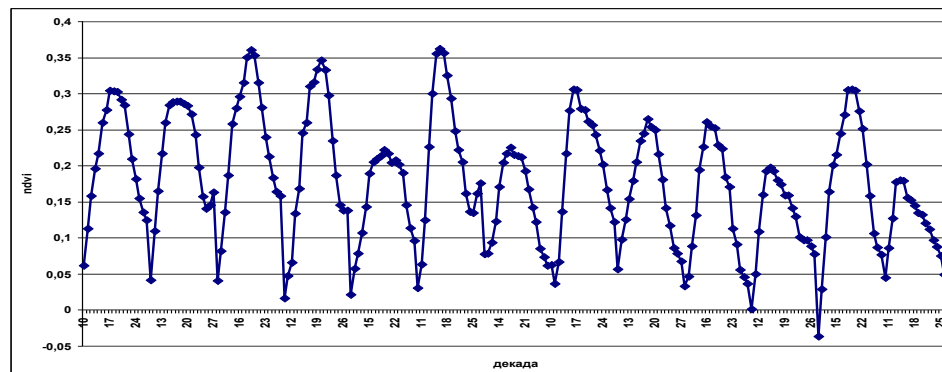
Интегральные индексы вычисляются по окончанию текущего вегетационного сезона, при этом каждому году соответствует одно значение индекса.

# Интегральные индексы вегетации

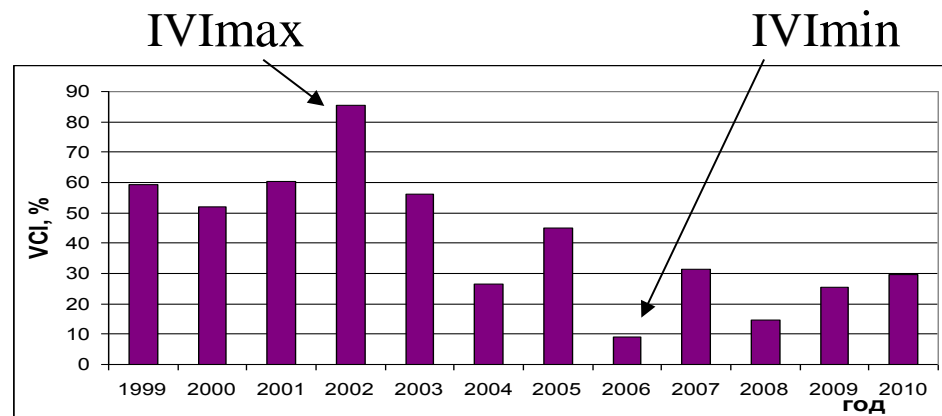
IVI - характеризует сезонный объем надземной биомассы в каждом пикселе и рассчитывается путем суммирования декадных значений NDVI за вегетационный сезон.

$IVIt = \sum_j NDVI_j$ ; j- номер декады в сезоне (от n1 до n2); t – номер сезона.

NDVI



IVI

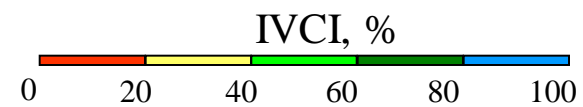
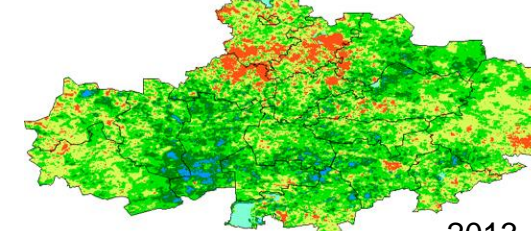
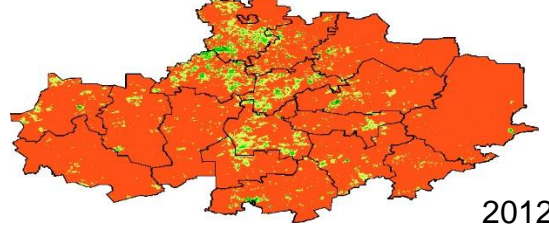
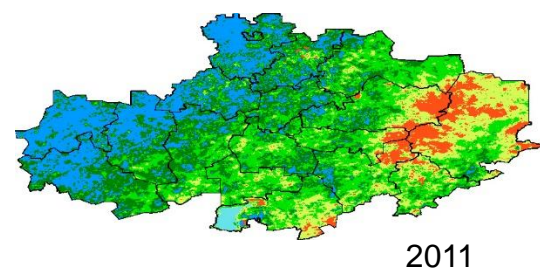
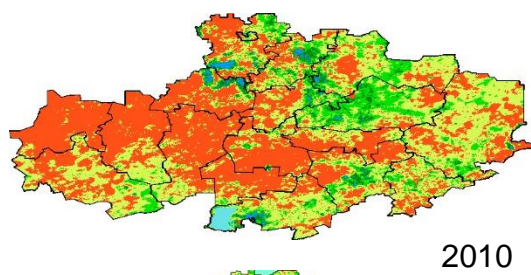
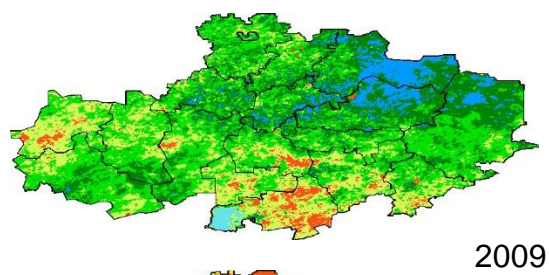
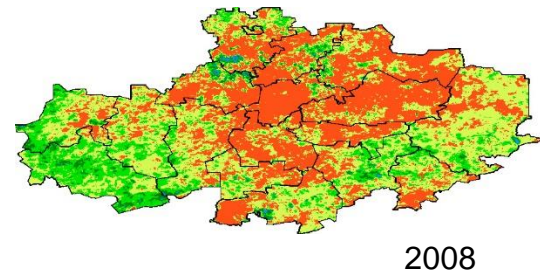
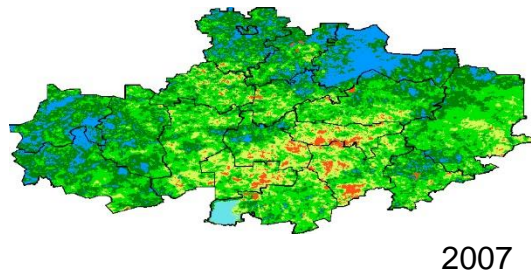
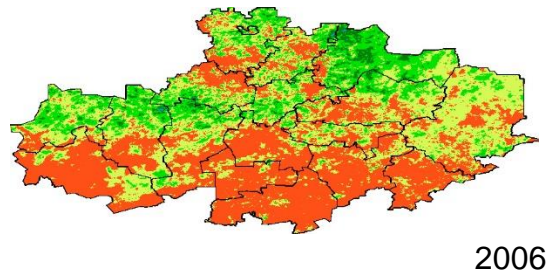
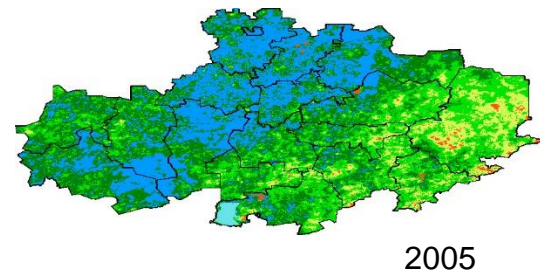
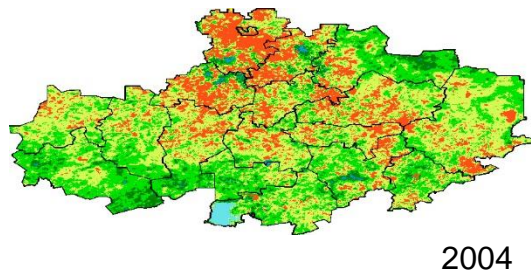
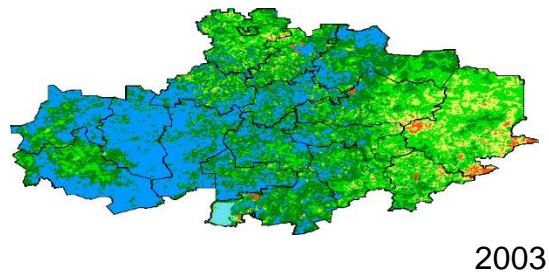
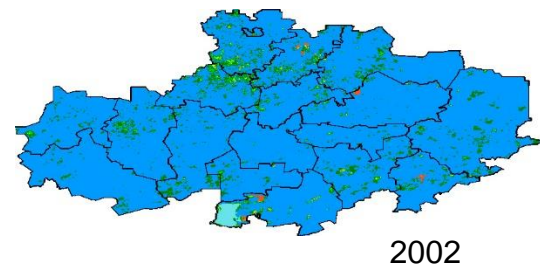
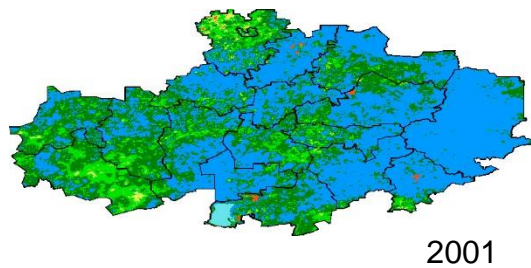
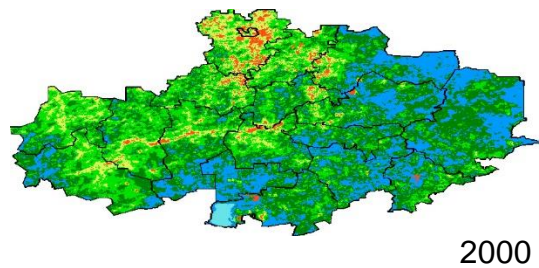


$IVCI_t = 100 (IVIt - IVI_{min}) / (IVI_{max} - IVI_{min})$ ; t – номер сезона

IVCI – характеризует относительную величину (%) накопленной сезонной биомассы за многолетний период и изменяется от 100% для наиболее благоприятных погодных условий до 0 – для самых неблагоприятных.



- Для прогноза урожайности на уровне области, нужно иметь временные ряды IVI и IVCI элементы которых характеризуют всю область, для прогноза по району – ряд значений, характеризующих район. Соответствующие ряды строятся путем осреднений пиксельных значений по всей территории области или района с учетом маски посевных площадей.

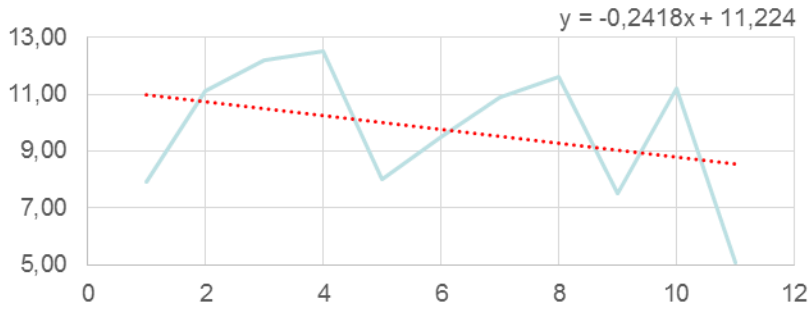


**Динамика индекса IVCI, Акмолинская область**

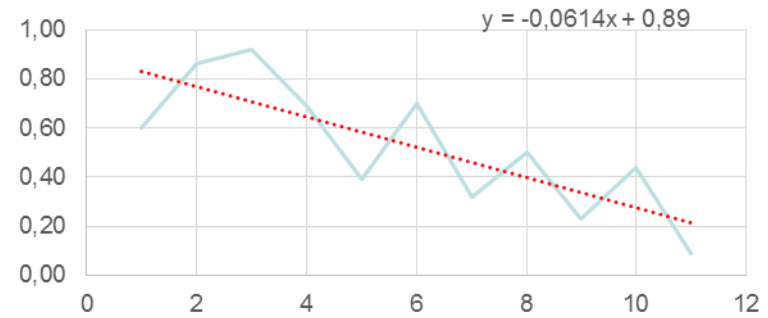
- Многолетние ряды осредненных значений IVCI могут быть использованы для анализа частоты засухи на уровне области, района, хозяйства и даже отдельного поля, позволяют ранжировать годы с учетом пространственного охвата и интенсивности стрессового воздействия погодных условий и хорошо коррелируют с продуктивностью надземной биомассы.

# Динамика урожайности (стат. данные) и IVCI. Акмолинской области

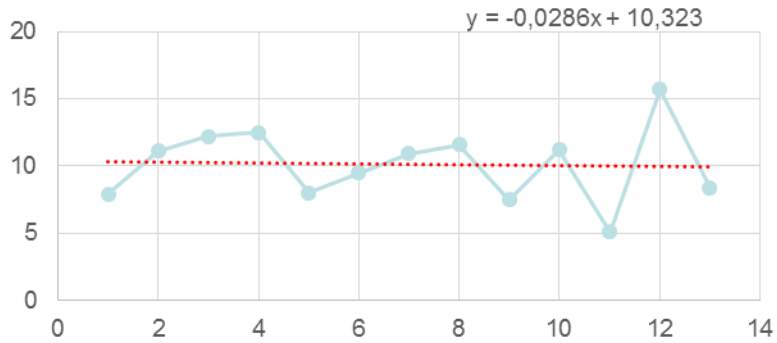
## Урожайность 2000-2010



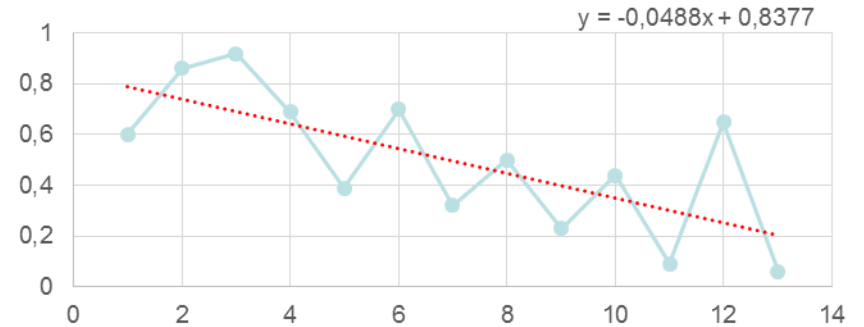
## IVCI 2000-2010



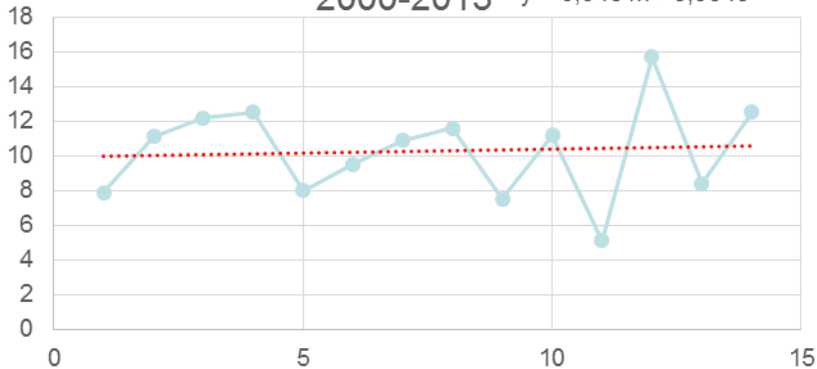
## Урожайность 2000-2012



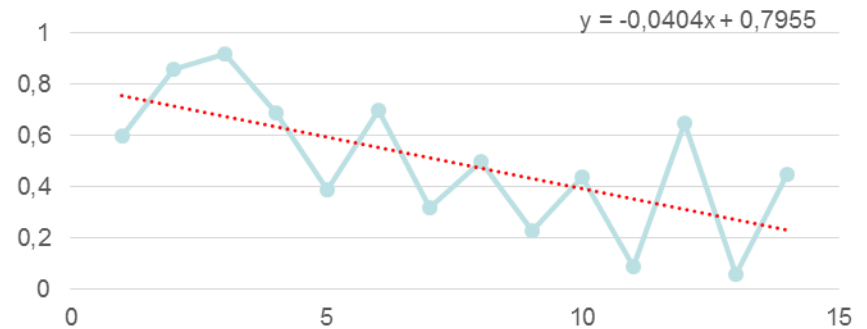
## IVCI 2000-2012



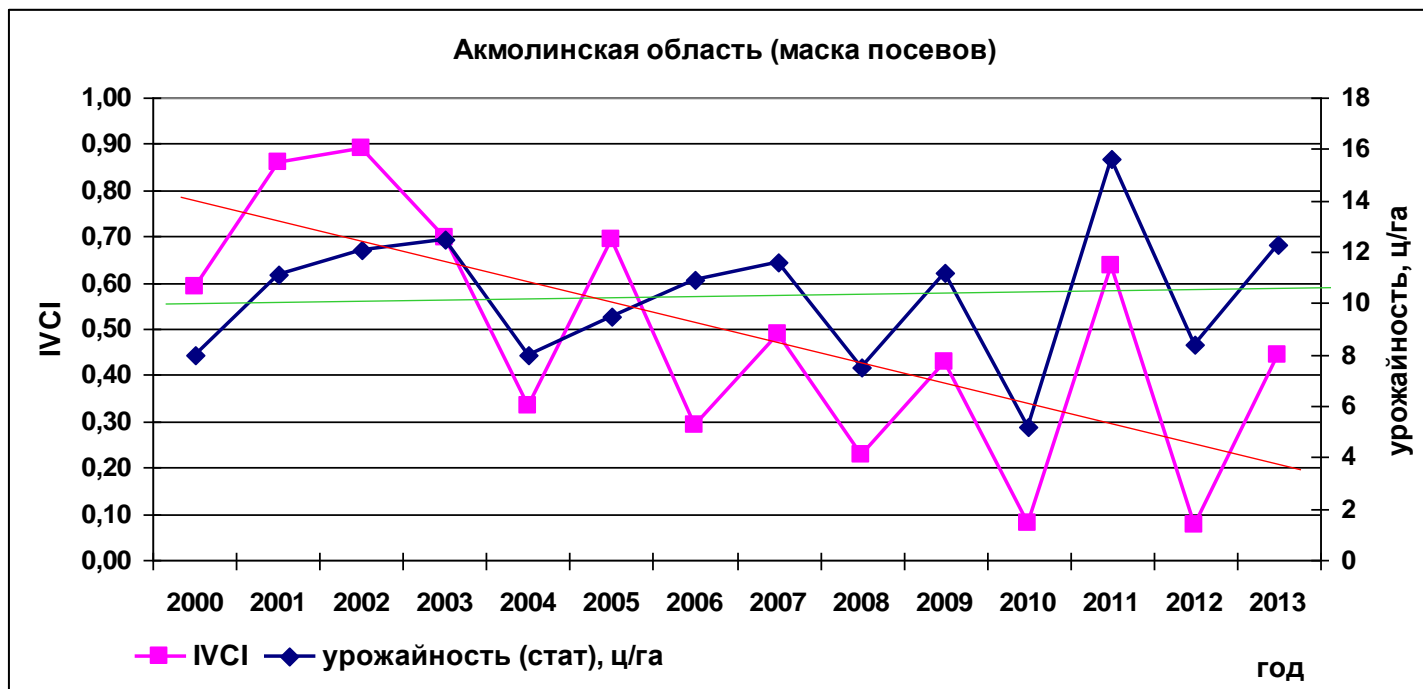
## 2000-2013 $y = 0,0451x + 9,9549$



## IVCI 2000-2013



## Корреляция значений урожайности зерновых культур и IVCI

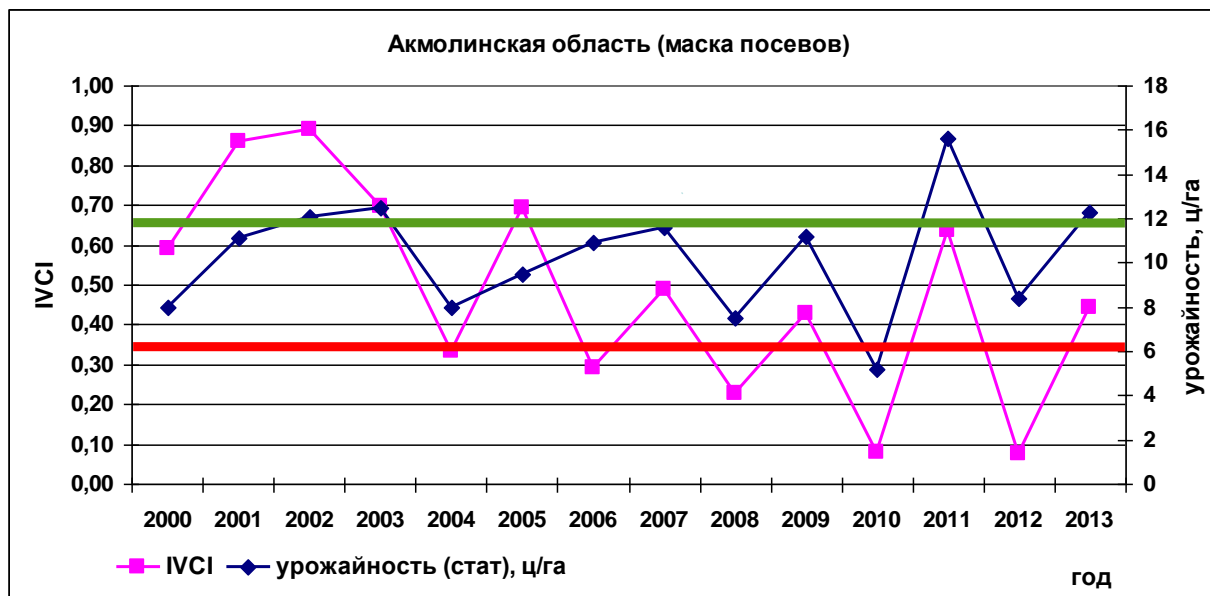


Период	Rкр	$y=at+b$	$Y_{T_{n+1}}$	$\Delta Y_{ск}$	$Y_{\phi}$	$ Y_{\phi} - Y_{T_{n+1}} $	$ Y_{\phi} - Y_{T_{n+1}} /Y_{\phi}$ %
2000-2010	0.72	$-0.24t + 11.2$	8.32	2.1	15.7	7.38	47
2000-2011	0.83	$0.04t + 10.0$	10.54	2.7	8.4	2.14	25
2000-2012	0.84	$-0.03 + 10.3$	9.92	2.64	12.5	2.58	20
2000-2013	0.85	$0.045t + 9.95$	10.63	2.52			

## Оценка априорной вероятности различных погодных условий за период (2000-2013 гг)

Для грубой оценки воздействия погодных условий вегетационного сезона можно использовать трех бальную ранговую шкалу:

- $65\% < IVCI$  – благоприятные погодные условия
- $33\% < IVCI < 65\%$  - нормальные погодные условия
- $IVCI < 33\%$  - неблагоприятные погодные условия



год	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<b>IVCI</b>	0.6	0.86	0.92	0.69	0.39	0.7	0.32	0.5	0.27	0.43	0.09	0.65	0.06	0.45
<b>Y</b>	7.99	11.1	12.2	12.5	8.0	9.5	10.9	11.6	7.5	11.2	5.1	15.7	8.4	12.5

# Прогноз урожайности на основе априорных вероятностей

$$Y_{\text{п}} = r_1 Y_1 + r_2 Y_2 + r_3 Y_3 \quad ; \quad r_1 + r_2 + r_3 = 1$$

где :

$r_1$  – априорная вероятность благоприятных погодных условий;

$Y_1$  - средняя урожайность при благоприятных погодных условиях;

$r_2$  – априорная вероятность «нормальных» погодных условий;

$Y_2$  - средняя урожайность при «нормальных» погодных условиях;

$r_3$  – априорная вероятность неблагоприятных погодных условий;

$Y_3$  - средняя урожайность при неблагоприятных погодных условиях.

В таблице приведены прогнозные значения урожайности для Акмолинской области на 2013 год, рассчитанные с учетом априорных вероятностей погодных условий по статистическим сведениям и данным ДЗЗ за период с 2000 года.

**По статистике  $S(5) = 1НБ + 3Н + 1Б$  (стабилизация)**

**По ДЗЗ  $S(5) = 2НБ + 1Н + 2Б$  (рост волатильности)**

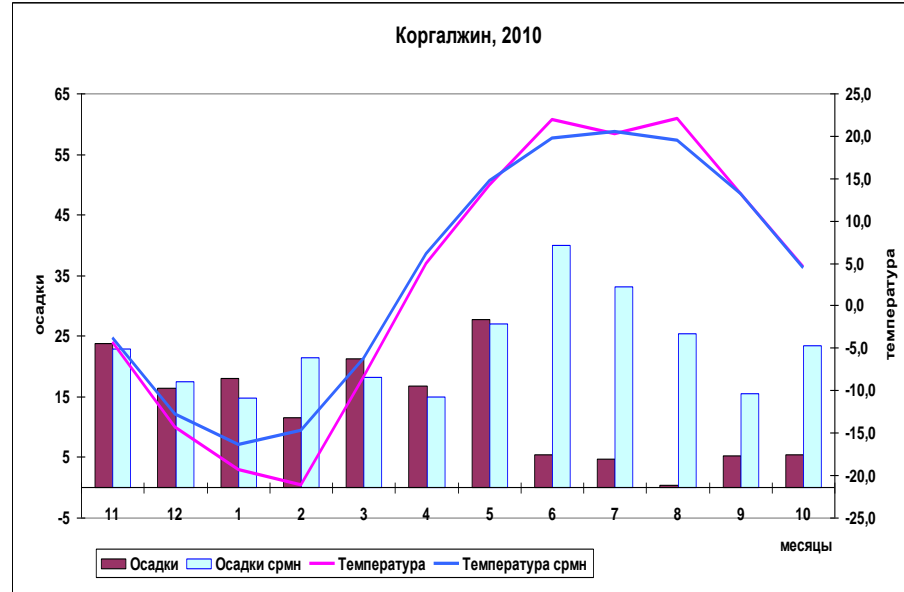
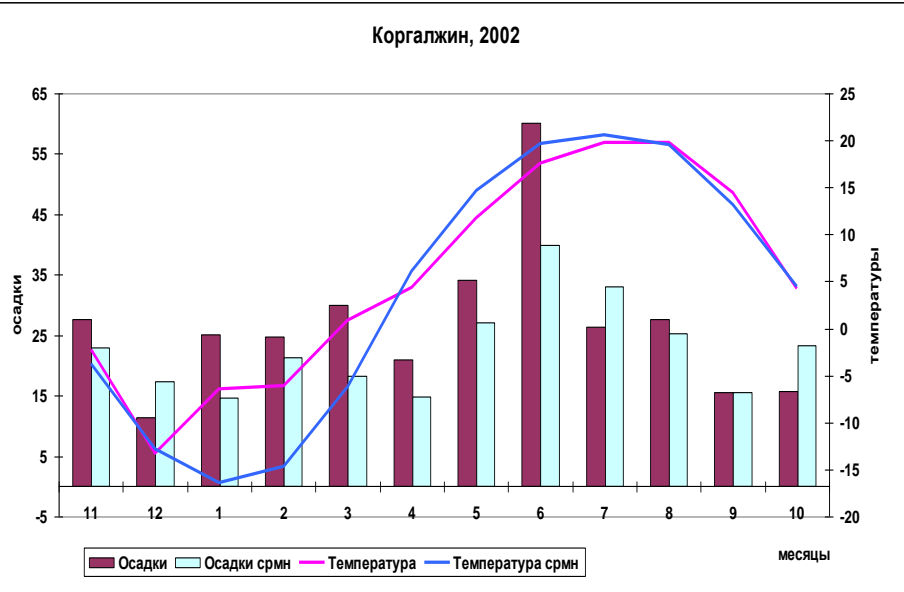
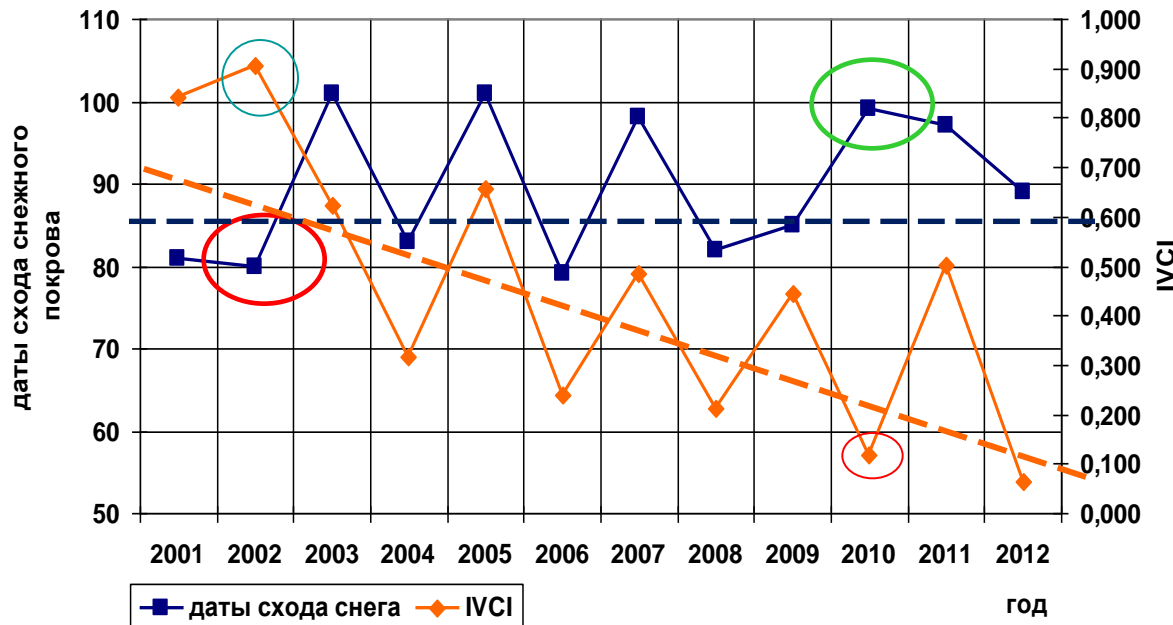
	$r_1$	$Y_1$	$r_2$	$Y_2$	$r_3$	$Y_3$	$Y_{\text{п}}$	$Y_{\text{ф}}$	$ Y_{\text{ф}} - Y_{\text{п}} $	%
Стат.	0.23	13.7	0.61	10.0	0.16	6.3	10.3	12.5	2.2	17.6
ДЗЗ	0.38	13.7	0.31	10.0	0.31	6.3	10.25	12.5	2.25	18



## Уточнение вероятности погодных условий с учетом локальных факторов

- Особенно сложно прогнозировать резкие колебания урожайности. При этом важнее правильно прогнозировать засушливые сезоны.
- В ряде случаев априорные вероятности ожидаемых погодных условий могут быть уточнены с учетом локальных факторов и закономерностей. Для Акмолинской области такими факторами являются :
  - сроки и темпы схода снежного покрова.  
Ранний и быстрый сход снега увеличивает вероятность засухи;
  - характер текущего цикла солнечной активности.  
В период низкой солнечной активности вероятность засух выше, чем для периодов высокой солнечной активности;
  - погодные условия в предшествующий сезон (сезоны).  
Вероятность повторной засухи (засухи после засухи) существенно ниже, чем после нормальных и благоприятных лет.

# Многолетние значения средних дат схода снежного покрова и IVCI Акмолинская область (2001-2012 гг.)



Динамика месячных осадков и температур, МС «Коргалжин» , Акмолинская область

В период низкой солнечной активности вероятность засух в Казахстане возрастает.

## Spot creation of the Sun

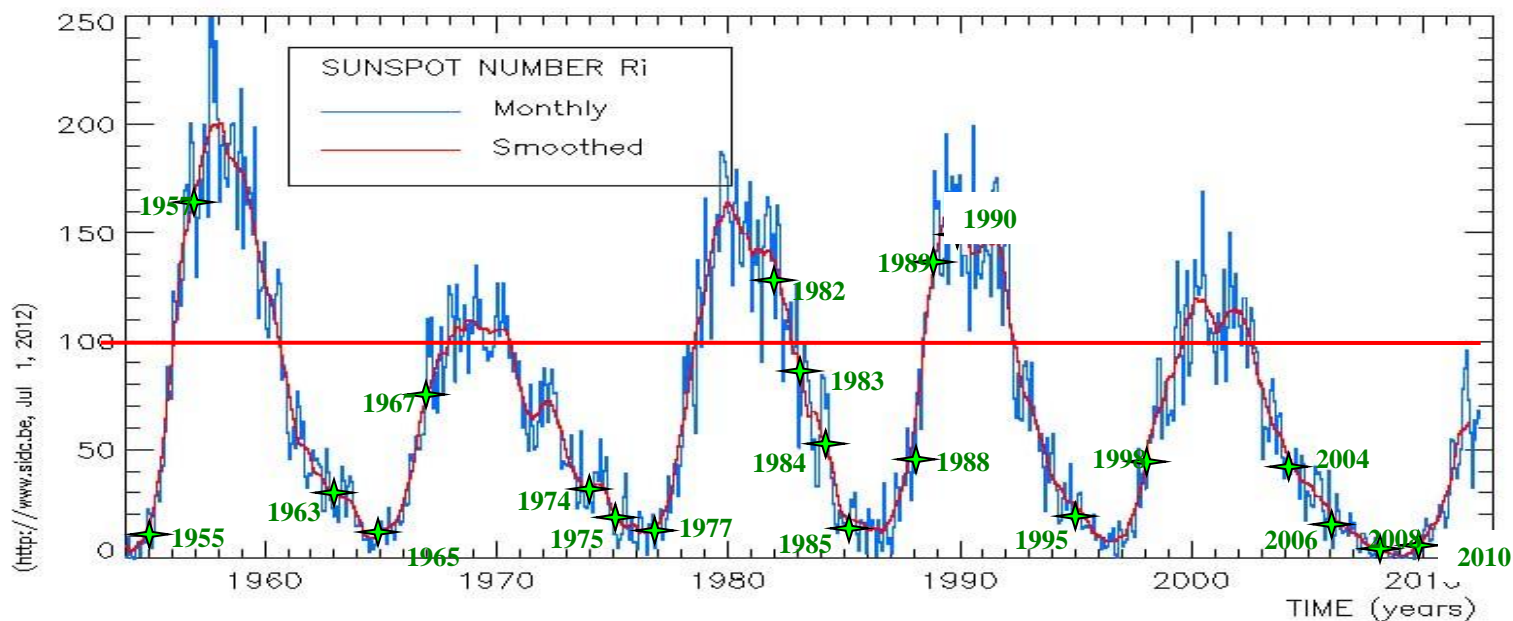
$$W = k(f + 10g)$$

$f$  – quantity of all separate spots detected on the Sun disk

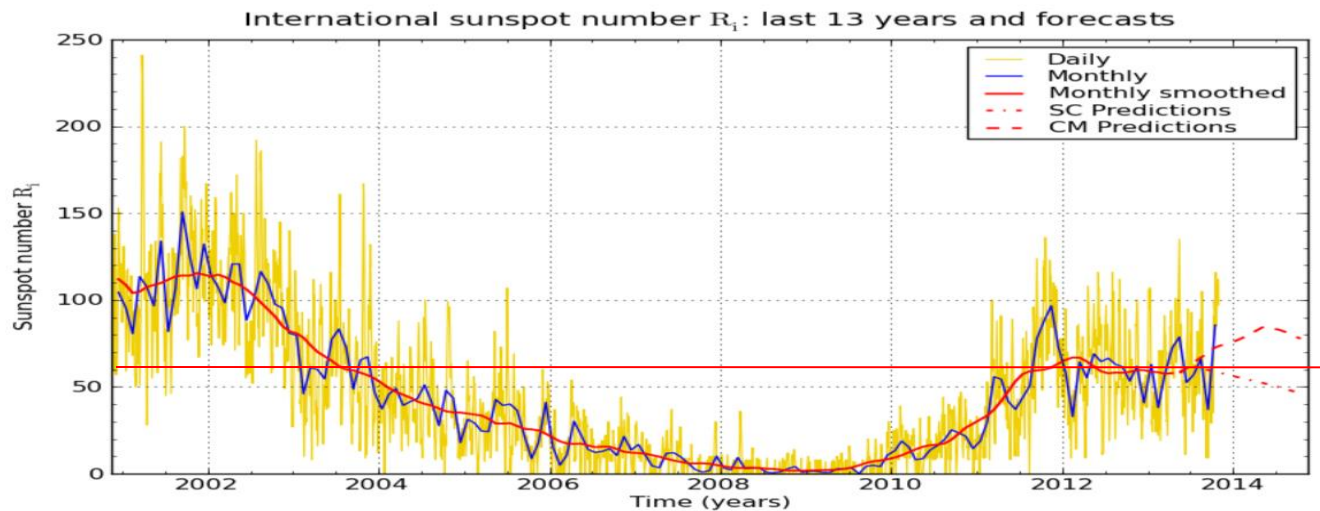
$g$  – number of created groups of spots

## Sunspot index graphics

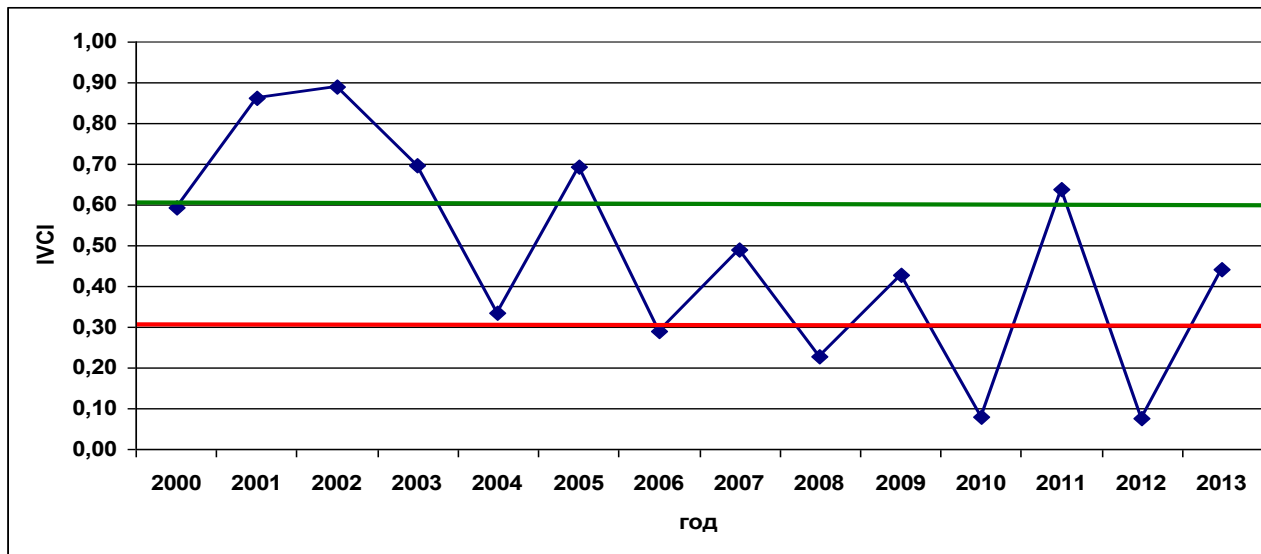
The monthly (blue) and monthly smoothed (red) sunspot numbers for the latest five cycles.



Цены на пшеницу на международном рынке в течение последних десятилетий колебались в соответствии с числами Вольфа

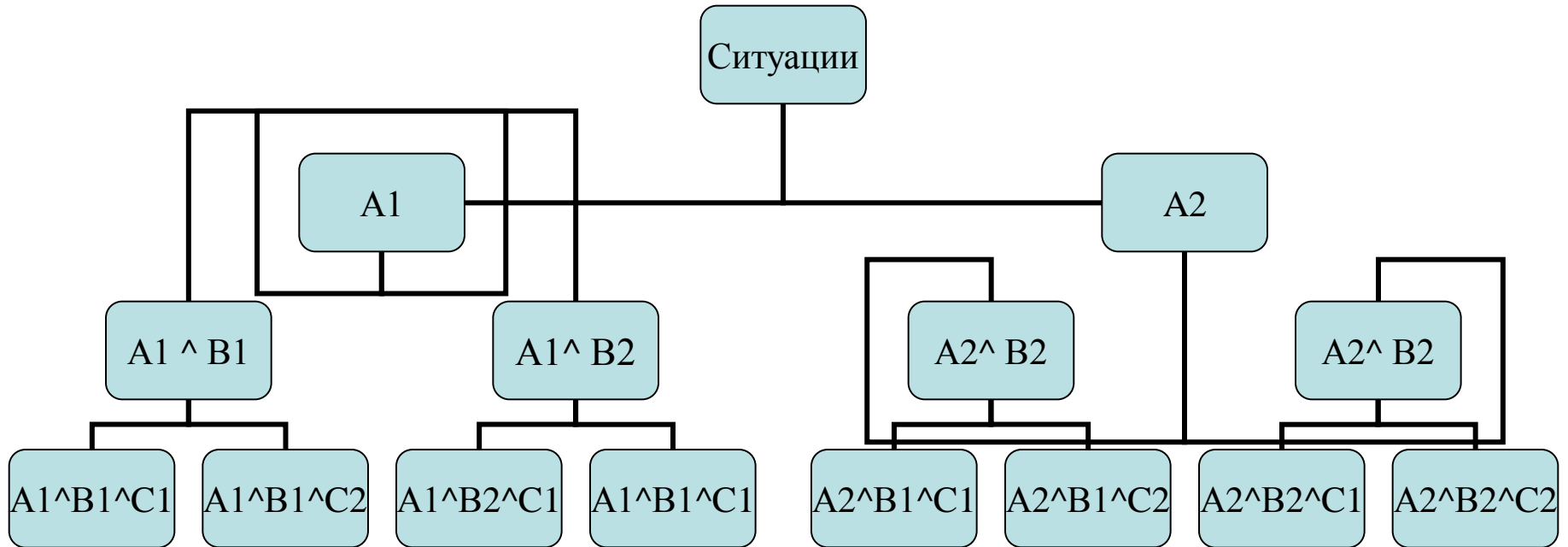


SILSO graphics (<http://sidc.be>) Royal Observatory of Belgium 01/11/2013



Связь многолетних вариаций IVCI и последнего цикла солнечной активности ( Акмолинская область)

# Дерево состояний для раннего прогноза погодных условий



A1 - низкая солнечная активность ( $w < 60$ )

A2 - высокая солнечная активность ( $w > 60$ )

B1 - не достаточный весенний влагозапас в почве

B2 - достаточный весенний влагозапас в почве

C1 - погодные условия предшествующего сезона неблагоприятные (засуха)

C2 - погодные условия предшествующего сезона нормальные или благоприятные

# Формирование и корректировка вероятностных оценок погодных условий

№	Ситуация/ Условие	Вероятность ситуации	Вероятность НБ	Вероятность Н	Вероятность Б
1	$A1 \wedge B1 \wedge C1$	$P1$	$r1 (P1)$	$r2 (P1)$	$r3 (P1)$
. . .					
8	$A2 \wedge B2 \wedge C2$	$P8$	$r1 (P8)$	$r2 (P18)$	$r3 (P18)$

$$\sum_i P_i = 1 \quad (i = 1, \dots, 8)$$

$$r1 (P_i) + r2 (P_i) + r3 (P_i) = 1$$

Корректировка вероятностных оценок по формуле Байеса

$$P(B) = \sum_{i=1}^N P(A_i)P(B|A_i) \qquad P(A|B) = \frac{P(B|A) P(A)}{P(B)}$$

# Общая схема прогноза

Вначале текущего года (до посева) рассчитывается предварительный прогноз, который определяет априорные вероятности того, что предстоящий сезон окажется засушливым, «нормальным» или благоприятным с учетом погодных условий предпосевного периода и локальных факторов.

- В ходе вегетационного сезона осуществляется регулярная подекадная оценка состояния растительности с целью раннего детектирования признаков засухи и при необходимости выполняется корректировка прогноза с учетом реального состояния посевов (см.рис)
- По завершению сезона подводятся итоговые оценки, рассчитывается фактический ущерб, определяются погрешности прогноза, корректируются вероятностные модели и типовые сценарии прогноза.

