

**THE METHOD OF SPACE MONITORING OF IRRIGATED AREAS IN
SOUTH KAZAKHSTAN WITH MODERATE RESOLUTION
SATELLITE DATA**

**Bekmuhamedov N.E.¹, Malakhov D.V.², Tsyhuyeva N.Yu.³
(Republic of Kazakhstan) Email: Bekmuhamedov517@scientifictext.ru**

*¹Bekmuhamedov Nurlan Erkinovich - Candidate of Agricultural Sciences, Head
of the Laboratory;*

²Malakhov Dmitry Victorovich - Leading Researcher;

*³Tsyhuyeva Natalia Yurjevna - Candidate of Geographical Sciences,
LABORATORY FOR SPACE MONITORING OF AGRICULTURAL
PRODUCTION,*

*JSC "NATIONAL CENTER OF SPACE RESEARCH AND TECHNOLOGY",
ALMATY, REPUBLIC OF KAZAKHSTAN*

Abstract: *methods of discrimination between irrigated and non-irrigated areas with satellite data are described along with the discussion on usability of moderate spatial resolution satellite data for monitoring of irrigated agricultural areas in arid zone of South Kazakhstan. The complex algorithm of irrigated area discrimination is based on calculation of temporal difference for thermal and vegetation indices during the vegetation period. Statistical peculiarities for satellite data are defined and described for irrigated and non-irrigated areas. The evaluation of applied algorithms for different agricultural conditions in South Kazakhstan is provided.*

Keywords: *remote sensing, monitoring, inventory, water-industry basins, Landsat, Sentinel.*

**МЕТОД КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОРОШАЕМЫХ
ТЕРРИТОРИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ СРЕДНЕГО
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЮЖНОГО
КАЗАХСТАНА**

**Бекмухамедов Н.Э.¹, Малахов Д.В.², Цычуева Н.Ю.³ (Республика
Казахстан)**

*¹Бекмухамедов Нурлан Эркинович - кандидат сельскохозяйственных наук,
заведующий лабораторией;*

²Малахов Дмитрий Викторович - ведущий научный сотрудник;

*³Цычуева Наталья Юрьевна - кандидат географических наук, ведущий
научный сотрудник,*

*Лаборатория космического мониторинга сельскохозяйственного
производства,*

*АО «Национальный центр космических исследований и технологий»,
г. Алматы, Республика Казахстан*

В работе рассмотрены способы распознавания орошаемых и богарных земель по данным спутниковой съемки, возможности применения спутниковой информации среднего пространственного разрешения для инвентаризации и мониторинга орошаемых территорий в условиях аридных территорий Южного Казахстана. Предложен комплексный подход, основанный на расчете разницы температурных и вегетационных индексов в течение вегетационного периода. Описаны статистические закономерности, характерные для спутниковых и наземных данных на территориях с преобладанием орошаемого и богарного типов земледелия. Проведена оценка точности индексов для различных условий земледелия в пределах Южного Казахстана.

Ключевые слова: водно-хозяйственные бассейны, инвентаризация, мониторинг, Landsat, Sentinel, дистанционное зондирование земли

Введение

Большинство сложностей по управлению водно-земельными ресурсами на базовом уровне в действительности являются информационной проблемой. Используя информационную систему и данные дистанционного зондирования в качестве источника оперативной информации, можно удовлетворить потребности всех сторон, связанных с сельским хозяйством, за счет общего и разделяемого доступа к объективной информации, что позволит мелиораторам применить принципы интегрированного управления водно-земельными ресурсами.

Дефицит водных ресурсов в совокупности со сложившейся экономической ситуацией в стране, приводит к сокращению водопотребления в республике. В настоящее время водозабор на сельское хозяйство сократился до 15 км³ (против 26 км³ в 1992 году), площадь регулярного орошения уменьшилась вдвое. В Казахстане на долю орошаемого земледелия приходится более 70% забора воды, а значит, оно является подотраслью экономики, на которую необходимо сделать акцент при эффективном использовании водных ресурсов [1]. В южных областях республики числится около 1,2 млн. га земель регулярного орошения (более 85 % всех земель орошения РК): в Южно-Казахстанской (30,7 %), Алматинской (36,6 %), Кызылординской (11,6 %), и Жамбылской (9,6 %). Одной из наиболее актуальных проблем, по мнению экспертов (Медеу и др. 2015 год), требующими срочного решения, в том числе названа проблема введение агроэкологического мониторинга, подразумевающего постоянное слежение и контроль, за количеством и качеством земельных ресурсов в условиях орошения.

Материал и методы

Территория, на которой проводились полевые обследования в июне-июле 2018 года - 4 водно-хозяйственных бассейна: Балкаш-Алакольский, Шу-Таласский, Арало-Сырдарьинский и Иртышский.

Данные полевых наблюдений и измерений представлены в виде таблиц с указанием географических координат точек отбора проб и описаний, с заполненной атрибутивной информацией о культуре, минерализации почв, температуре почв, состоянии посевов, наличии и качеству ирригационных сетей. Сроки проведения выездов на выбранные участки зависят от погодных условий конкретного года и синхронизации с датами пролетов космического аппарата Landsat-8. Для региона «Мактаарал» количество обследованных полей равно 368, для региона «Туркестан» - 399. Для региона «Боролдай» с подавляющим большинством богарных полей, специальные измерения не проводились.

Инструменты, используемые в ходе полевых работ:

- 1) GPS-навигатор, для точного определения географических координат описываемых точек и границ полигонов исследования;
- 2) бесконтактный термометр STtm PRO PLUS для определения температуры воздуха, почвы и растений;
- 3) прибор Ассураг LP80 для определения LAI - индекса листовой поверхности;
- 4) фотоаппарат для проведения фотосъемки в надире над посевом (для расчета проективного покрытия почвы растительностью) и в перспективе;
- 5) рулетка (линейка) для определения высоты и густоты растений.

Обработка спутниковых данных проведена в ПО ENVI 5.0, статистическая обработка наземных и спутниковых данных – в ПО STATSOFT STATISTICA 12, картографические представления результатов работы выполнены в ПО ESRI ArcGIS 10.2.

Для выполнения расчетов применялись спутниковые данные Landsat-8 OLI и Sentinel-2. Характеристики датчиков Landsat-8 OLI позволяют на основе априорной информации о свойствах подстилающей поверхности успешно применять данные этого спутника для оценки состояния растительного покрова. Предварительная обработка снимков Landsat включает атмосферную коррекцию и пересчет значений на сенсоре в значения Reflectance и Radiance. Пересчет проводится стандартными процедурами Excelis ENVI.

Набор данных Sentinel-2, является стандартным продуктом Level-1C, который включает орторектификацию и пространственную регистрацию в глобальной системе отсчета с субпиксельной точностью. Продукт Sentinel-2 Level-1C состоит из 110-километровых плиток в проекции UTM / WGS84 и обеспечивает отражательную способность Top-Of-Atmosphere (TOA). Мы создали Sentinel 1-2 Level-2A с использованием языка программирования Python, для выполнения коррекции входных данных TOA с атмосферой, рельефом местности и перистыми облаками. Для некоторых полузасушливых областей коррекция важна для облачных изображений, поскольку сезонные колебания концентрации аэрозоля в виде сухой пыли являются высокими и меняют коэффициент отражения.

Набор данных Sentinel-1 содержит данные об измерении уровня земли (GRD) уровня 1 в режиме интерферометрического широкополосного (IW), состоящего из сфокусированных данных SAR, которые были многократно просмотрены и проецированы в наземный диапазон с использованием модели эллипсоида Земли WGS84. Полученные изображения в двойной поляризации (VH и VV) имеют размерность 270 x 270 км с разрешением 10 м. Коррекция ландшафта была применена для геокодирования изображений путем коррекции геометрических искажений SAR (ракурс, прокладка и тень) с использованием цифровой модели рельефа от миссии ракеты-спутника Shuttle, создающей изображения с заземлением.

Основная часть исходных данных дистанционного зондирования, используемых для мониторинга орошаемых территорий, представлена космоснимками среднего разрешения (Sentinel-2, Landsat-8), с периодичностью от 3 до 8 дней и общим покрытием территории ВХБ около 90 %.

В рамках настоящего проекта проанализированы три основных вегетационных индекса: NDVI, NDWI, MNDWI, (таблица 1).

Таблица 1. Индексы, использованные в работе

| Индекс | Уравнение | Ссылка |
|---|--|----------------------------|
| NDVI, Normalized Difference Vegetation Index | $NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$ | Rouse, J. W., et al., 1973 |
| NDWI, Normalized Difference Water Index | $NDWI = \frac{(\rho_{857} - \rho_{1241})}{(\rho_{857} + \rho_{1241})}$ | B.Gao .1995 |
| MNDWI, Modified Normalized Difference Water Index | $MNDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$ | Xu, 2005 |

NDVI нашел широкое применение в изучении растительности; он используется для оценки состояния и урожайности сельскохозяйственных культур, продуктивности пастбищ, оценки залежей и т.д. Очень часто индекс напрямую связан с другими наземными параметрами, такими как проективное покрытие, фотосинтетическая активность растений, поверхностная влага, индекс площади листвы и количество биомассы.

По распределению индекса NDVI распознаются участки со здоровой растительностью (поглощает электромагнитное излучение в красном диапазоне спектра и отражает большую часть в ближнем инфракрасном интервале) и угнетённой или разреженной растительностью (отражает больше в видимом и меньше в ближнем инфракрасном каналах). В силу своей привязанности к количеству фотосинтезирующей биомассы, NDVI

не эффективен на снимках, полученных в сезон ослабленной или невегетирующей в этот период растительности.

Расчет содержания влаги в зеленой биомассе основан на методе, предложенном В.Гао. Автор предложил узкополосный индекс концентрации влаги в зеленой биомассе в качестве инструмента оценки статуса зеленой растительности.

Примечательно, что индекс учитывает только каналы инфракрасного спектра, в то время, как «классические» вегетационные индексы основаны на применении красного и инфракрасного каналов. Применение данного индекса основано на том, что спектр поглощения воды в коротковолновом ИК диапазоне значительно сильнее, нежели в ближнем ИК диапазоне. В работе использована модификация индекса Гао под Landsat – 8 OLI, имеющая вид

$$NDWI = (\text{float}(b5) - \text{float}(b6)) / (\text{float}(b5) + \text{float}(b6)),$$

где $b5$ и $b6$ – соответствующие каналы изображения Landsat – 8 OLI.

Modified Normalized Difference Water Index более чувствителен по сравнению с NDWI. В работе были использована разница между ранними и поздними снимками.

$$MNDWI_{dif} = MNDWI_1 - MNDWI_2,$$

где $MNDWI_{dif}$ – разница значений влажности, $MNDWI_1$ – значения влажности, рассчитанные по позднему снимку, $MNDWI_2$ – значения влажности, рассчитанные по раннему снимку.

Положительные значения $MNDWI_{dif}$ свидетельствуют о накоплении влаги в зеленой растительности, о приросте биомассы за наблюдаемый период, т.е. о регулярном орошении. Отрицательные или близкие к нулю значения $MNDWI_{dif}$ говорят о дефиците влаги в почве, замедленном накоплении жидкости в тканях растения, отсутствии прироста биомассы – т.е. об отсутствии полива. Как было указано выше, динамика отдельных индексов, при сохранении трендов, имеет известное количество флуктуаций, вызванных как искусственными (сроки полива, сроки посева, начало уборки), так и естественными (выпадение осадков) причинами. Для выявления устойчивых трендов и корреляций целесообразнее пользоваться не временным рядом того или иного параметра, а дискретными величинами разности наблюдаемого параметра, получаемыми простым вычитанием данных ранней спутниковой съемки из данных более поздней съемки.

Результаты

Территория Казахстана в целом, и сельхозпроизводящие территории четырех водно-хозяйственных бассейнов (ВХБ) находятся в зоне рискованного земледелия, то есть количество влаги, попадающее в почву с осадками, является недостаточным для успешного возделывания сельскохозяйственных культур.

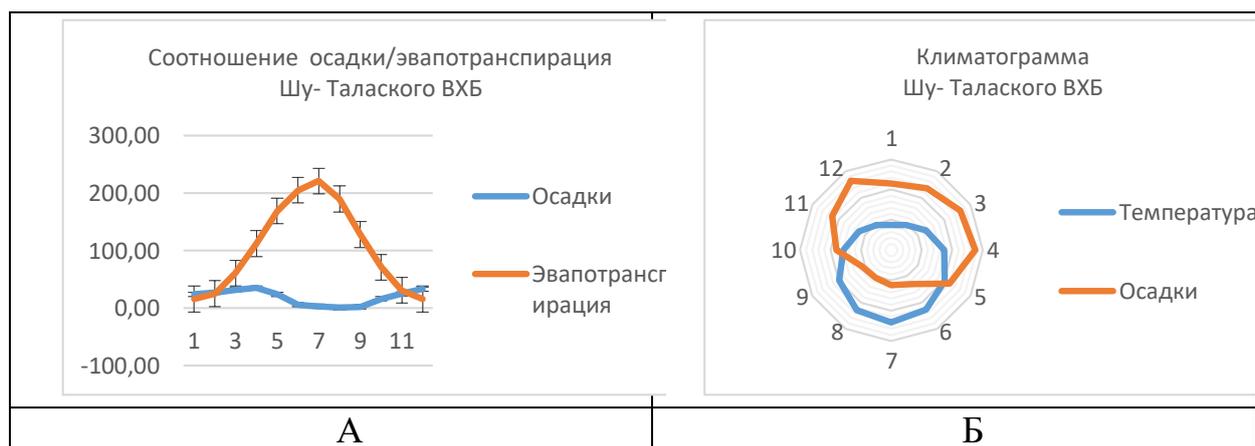
Для иллюстрации этого утверждения были построены графики соотношения осадков и потенциальной эвапотранспирации [2] для Балхаш-Алакольского и Шу-Талаского (ВХБ) (рисунки 1-2).



А – Осадки/эвапотранспирация; Б - Климатограмма

Рис. 1. Соотношение осадков к эвапотранспирации и климатограмма Балхаш-Алакольского ВХБ

Анализ графиков показывает преобладание испарения над количеством осадков с марта по ноябрь 2018 года, засушливость климата с мая по ноябрь 2018 года.



А – Осадки/эвапотранспирация; Б - Климатограмма

Рис. 2. Соотношение осадков к эвапотранспирации и климатограмма Шу-Талаского ВХБ

Анализ графиков показывает преобладание испарения над количеством осадков с марта по ноябрь 2018 года, засушливость климата с мая по октябрь 2018 года.

Согласно классификации климатов по Коппену и Гейгеру [3], территория Южного Казахстана, занятая под орошаемое земледелие, попадает в зоны BSk (Аридная/Пустынная/Холодная) и Dsa (Холодная/Сухое лето/Жаркое лето).

Таким образом, регионы отличаются неблагоприятными для возделывания сельскохозяйственных культур климатическими условиями, предполагающими наличие искусственного орошения для получения урожая.

Исходя из сказанного выше, теоретическими предпосылками для распознавания орошаемых и богарных земель следует считать динамику вегетационных индексов и динамику температур подстилающей поверхности. Для орошаемых полей динамика вегетационных индексов должна быть положительной (прирост значений) за вегетационный период. Прирост значений вегетационных индексов обусловлен ростом зеленой биомассы и, соответственно, увеличением количества хлорофилла в тканях здоровых растений. Для богарных территорий прирост значений вегетационных индексов за тот же период наблюдений должен иметь негативную тенденцию в связи с ранними сроками уборки озимых и/или угнетенным состоянием растительного покрова на неорошаемых полях.

Корреляции разностей спектральных индексов и состояния полей в орошаемой зоне, изученные в данном проекте, свидетельствуют о перспективности применения выбранных методов инвентаризации орошаемых территорий (таблицы 2-5).

Коэффициент корреляции Пирсона – стандартный коэффициент корреляции, характеризующий наличие линейной зависимости между двумя величинами/выборками. Коэффициент корреляции рассчитан отдельно для Шу-Таласского ВХБ и Балхаш-Алакольского ВХБ, где первая пара снимков датирована 13 июня и 2 июля, вторая пара снимков - 15 июня и 11 июля 2018 года. Результаты представлены в таблицах 2-3 (курсивом выделены значимые корреляции).

Таблица 2. Коэффициент корреляции Пирсона между классом «орошаемые поля» и расчетами спутниковых данных Шу-Таласского ВХБ

| | NDVI _s | NDVI | NDWI _s | NDWI | MNDWI _s | MNDWI |
|--|-------------------|--------------|-------------------|--------------|--------------------|---------|
| | hort | long | hort | long | hort | long |
| Irrigated fields | 0,0263 | 0,285 | 0,0219 | 0,269 | 0,0673 | -0,0145 |
| Marked correlations are significant at $p < 0,05000$, N=365 | | | | | | |

*Здесь и в таблицах корреляций (таблицы 3-5) индекс “short” означает разницу между снимками в две недели, индекс “long” означает разницу в 25 дней.

Таблица 3. Коэффициент корреляции Пирсона между классом «орошаемые поля» и расчетами спутниковых данных Балхаш-Алакольского ВХБ

| | NDVI _s | NDVI | SAVI _s | SAVI | MNDWI _s | MNDWI |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------|
| | hort | long | hort | long | hort | long |
| Irrigated fields | 0,1449 | 0,450 4 | 0,112 2 | 0,415 4 | -0,0132 | 0,1618 |
| Marked correlations are significant at $p < 0,05000$, $N=393$ | | | | | | |

Как видно из таблиц, наилучшей корреляцией с классом «орошаемые поля» обладают разности вегетационных индексов. Индекс влажности почвы слабо связан с наличием орошения, либо не связан совсем. Данный факт находит свое объяснение, если принять во внимание количество зеленой биомассы на орошаемых полях и большую общую площадь листовой поверхности, часто полностью закрывающую почву. Очень важным фактом является рост корреляции абсолютно во всех рассматриваемых случаях с увеличением периода между датами спутниковой съемки. Эта особенность является основой для инвентаризации орошаемых территорий, в то время, как краткосрочные разницы индексов или данные единичной съемки не обладают всей полнотой информации, отражая только текущее состояние полей (осуществлен полив, или нет).

Коэффициент корреляции Спирмена (Spearman rank correlation coefficient) — мера линейной связи между случайными величинами.

Статистика Спирмена предполагает, что рассматриваемые переменные измерены как минимум в порядковой шкале, иными словами — индивидуальные наблюдения ранжированы. Расчёт корреляций Спирмена приведен в таблицах 4 и 5, где первая пара снимков датирована 13 июня и 3 июля 2018 года, вторая пара снимков - 13 июня и 9 июля 2018 года (курсивом выделены значимые корреляции).

Таблица 4. Коэффициенты корреляции Спирмена между классом «орошаемые поля» и расчетами спутниковых данных для Шу-Таласского ВХБ

| | NDVI _s | NDVI | NDWI _s | NDWI | MNDWI _s | MNDWI |
|--|-------------------|------|-------------------|------|--------------------|-------|
|--|-------------------|------|-------------------|------|--------------------|-------|

| | hort | long | hort | long | hort | long |
|--|--------|-------------------|--------|--------------|--------|---------|
| Irrigated fields | 0,0491 | 0,294 2 | 0,0471 | 02879 | 0,0029 | -0,0125 |
| Marked correlations are significant at $p < 0,05000$, $N=342$ | | | | | | |

Таблица 5. Коэффициенты корреляции Спирмена между классом «орошаемые поля» и расчетами спутниковых данных для Балхаш-Алакольского ВХБ

| | NDVI _s | NDVI | NDWI _s | NDWI | MNDWI _s | MNDWI |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|--------------------|--------|
| | hort | long | hort | long | hort | long |
| Irrigated fields | 0,2066 | 0,413 2 | 0,1892 | 0,3910 | -0,0815 | 0,1577 |
| Marked correlations are significant at $p < 0,05000$, $N=388$ | | | | | | |

Наилучшей корреляцией с классом «орошаемые поля» обладают разности вегетационных индексов.

Дополнительно, проведена верификация расчетов спутниковых данных с наземными данными (таблица 6). Показано, что величина ошибки при определении орошаемых полей с помощью разностей вегетационных индексов не превышает 15% при длительности наблюдений не менее месяца. Увеличение периода между съемками должно снизить величину ошибки, поскольку, как было показано выше, достоверность спутниковых наблюдений возрастает по мере увеличения временного разрыва между съемками. Однако, следует учитывать факторы, которые невозможно опознать или скорректировать при спутниковых расчетах. Среди них, например, такие, как сроки сева, частота поливов, частота и интенсивность атмосферных осадков.

Таблица 6. Ошибки классификации орошаемых полей по разностям индексов и температур, %

| Шу-Таласский ВХБ | | Балхаш-Алакольский ВХБ | | Усредненная ошибка, % |
|----------------------|----------|------------------------|----------|-----------------------|
| Index | error, % | Index | error, % | |
| MNDWI _{dif} | 28,02 | MNDWI _{dif} | 13,9 | 20,96 |
| NDVI _{dif} | 11,28 | NDVI _{dif} | 20,3 | 15,79 |
| NDWI _{dif} | 10,77 | NDWI _{dif} | 18,3 | 14,53 |

На основании описанного метода расчета разности вегетационных индексов получены карты орошаемых и богарных площадей (рисунки 3-4).

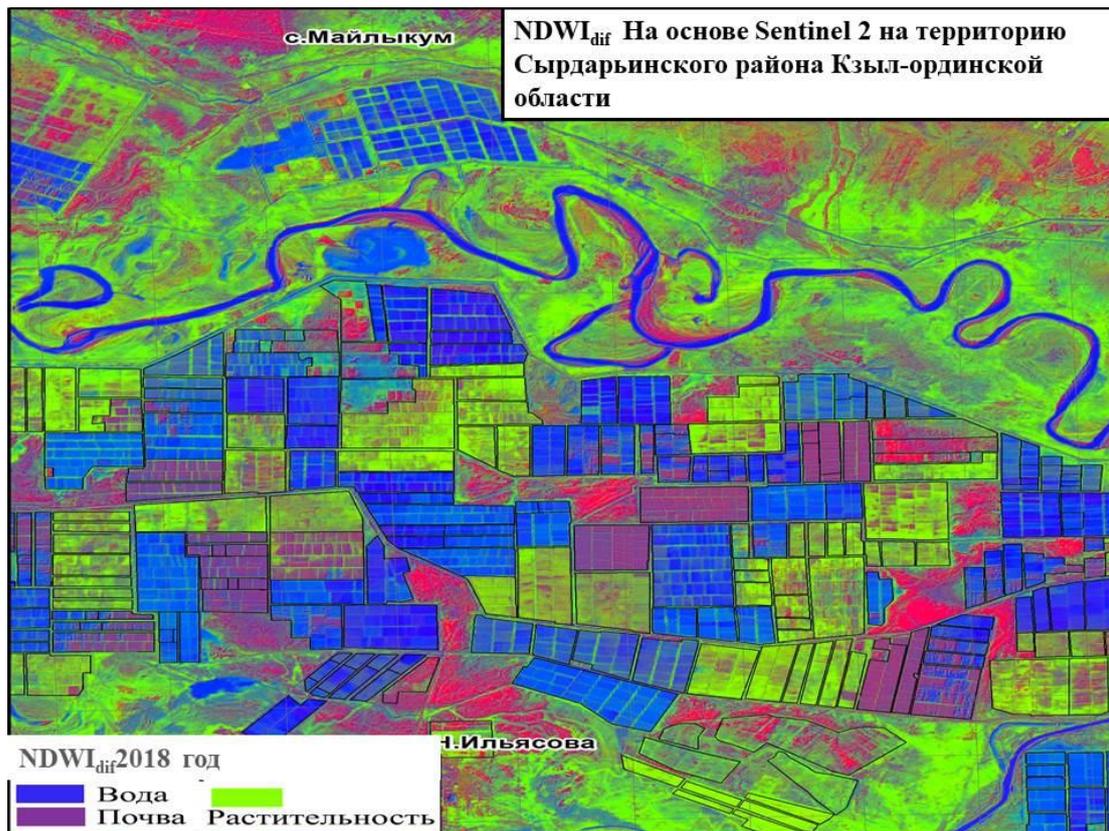


Рис. 3. Карта орошаемых полей Сырдарьинского района по данным ДЗЗ, лето 2018 года

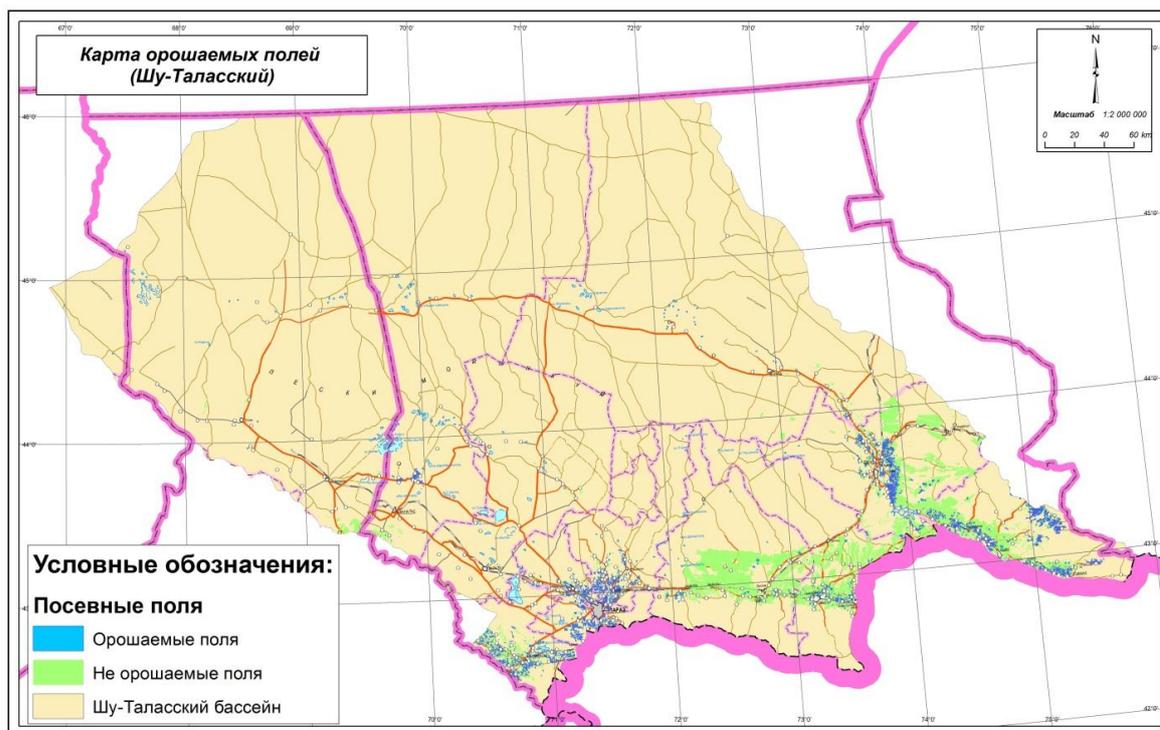


Рис. 4. Карта орошаемых полей Шу-Таласского бассейна, июнь-июль 2018 года

Обсуждение

Культуры, которые требуют регулярного увлажнения для возделывания (бахчевые, кукуруза, овощные, хлопок) демонстрируют устойчивое возрастание показателей вегетационного индекса. Динамика вегетационных индексов на полях люцерны, при сохранении общего положительного тренда, имеет более стохастический характер, что связано, как с уборкой люцерны несколько раз в течение вегетационного периода, так и с ее орошением, осуществляемым нерегулярно. Динамика паровых полей показывает разброс значений, как вегетационных индексов, так и температур. В ряде случаев наблюдается положительный тренд вегетационных индексов, обусловленный, вероятнее всего, развитием сорных видов на паровых полях. Динамика вегетационных индексов на озимых культурах, в целом, соответствует теоретическим ожиданиям, проявляя спад значений вегетационных индексов. Имеющиеся в ряде случаев всплески значений (или, говоря статистическим языком – выбросы), могут быть объяснены условиями возделывания, разными сроками сева или атмосферными осадками.

Заключение

Предлагаемый метод является эффективным инструментом оценки площадей орошаемых территорий для условий четырех ВХБ. Комплексное использование вегетационных индексов, получаемых на основе данных

ДЗЗ среднего пространственного разрешения позволяет с приемлемой точностью оценивать динамику орошения и отличать орошаемые территории от богарных. Дальнейшим развитием предлагаемой методики может быть ее адаптация к данным ДЗЗ высокого разрешения и разработка автоматизированного процесса обработки спутниковых данных в целях повышения точности распознавания орошаемых и богарных территорий.

Благодарность

Работа выполнена в рамках НТП «Научно-технологическое обоснование по рациональному использованию водных ресурсов при увеличении площадей регулярного и лиманного орошения по всем водохозяйственным бассейнам Республики Казахстан до 2021 года».

Авторы выражают признательность Р.Т. Искакову (АО «НЦКИТ»), А.А. Арыстанову (АО «НЦКИТ»), А.С. Айсаровой (АО «НЦКИТ») и А.Ф. Исламгуловой за содействие в проведении наземных исследований, оказали ценную консультативную помощь в ходе подготовки рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов с любыми лицами и/или организациями.

Список литературы / References

- 1 Медеу А.Р., Мальковский И.М., Толеубаева Л.С., Алимкулов С.К. Водная безопасность Республики Казахстан: проблемы устойчивого водообеспечения. Алматы, 2015. 582с.
- 2 Усков И.Б., Николаев М.В., Мищенко А.Ф., Усков А.О. Управление агроклиматическими рисками по данным дистанционного зондирования. ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт. С. 176-184 // В сборнике Материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Применение средств дистанционного зондирования земли в сельском хозяйстве». Санкт-Петербург. 16-17 сентября 2015 г.
- 3 Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B & Rubel F., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated // Meteorologische Zeitschrift. - № 15. P. 259–263. [Обновленная мировая карта классификации климата по Köppen-Geiger // Метеорологический журнал. № 15. С. 259-263].