

УДК 551[507.362.2:577.38]574

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ В МОНИТОРИНГЕ ПОЧВЕННОЙ ЗАСУХИ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА**Р.М. Илякова  
П.К. Таплиял

Выполнен сравнительный анализ квази-синхронных данных о яркостной температуре и почвенной влаге, измеренных радиометром AMSR-E, находящегося на борту спутника AQUA, и данных о почвенной влаге и осадках семи метеорологических станций Казахстана: Комсомольское, Казыгурт, Дмитриевка, Аркалык, Аккум, Есиль, Казталовка за период май – август 2002...2007 гг. для оценки возможности использования спутниковых данных в мониторинге почвенной засухи. Использование яркостной температуры способствует улучшению мониторинга влажности почвы и раннему выявлению возможности возникновения засухи.

Космические исследования, включая спутниковые метеорологические исследования, относятся к числу достаточно новых направлений отечественной науки. Мониторинг засухи является одной из важнейших прикладных задач космического мониторинга для таких засушливых регионов, к которым относится Казахстан.

Главная задача космических методов исследований в метеорологии – получить необходимую первичную информацию об атмосферных процессах и явлениях, о состоянии земной поверхности и океана в планетарном масштабе и разработать методы использования этой информации для анализа и прогноза погоды, экологического состояния окружающей среды, изучения климата.

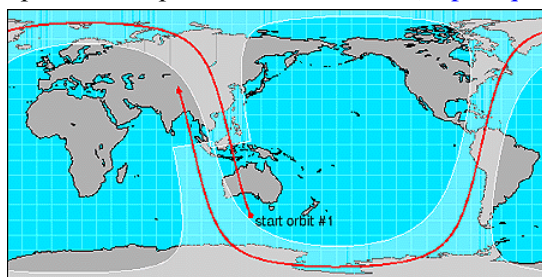
Применение микроволновой радиометрической аппаратуры на искусственных спутниках земли (ИСЗ) расширяет возможности спутниковой метеорологии, позволяя изучать состояние земной поверхности сквозь облачность, так как для распространения волн сантиметрового диапазона она не является препятствием.

В основе микроволнового исследования атмосферы с помощью ИСЗ лежит способность всех тел в природе излучать и поглощать энергию. С изменением температуры земной поверхности, ее влагосодержания

и других показателей ее состояния, в зависимости от наличия на ней воды, снега, осадков, количества растворенной в воде соли изменяются тепловые потоки, излучаемые от земной поверхности. Измеряя тепловые потоки высокочувствительной аппаратурой, работающей в диапазоне микроволн, можно судить о многих процессах, происходящих на поверхности океана, суши, в облаках и в атмосфере.

В последнее десятилетие преимущества технологий дистанционного сбора данных и их применение для решения экологических проблем, связанных с климатическими условиями, привели к разработке новых методов мониторинга засухи и связанных с ней ущербами сельскохозяйственному производству [2, 3].

Полярно-орбитальные спутники устанавливаются на циклических солнечно-синхронных орбитах. Они находятся на высотах от 700 до 800 километров с орбитальными периодами 98...102 мин. Спутники имеют метеорологическое и геофизическое значение из-за их глобального охвата с высоким разрешением. Они продолжают разрабатываться для низких орбит и для высоких широт. Орбитальная дорожка спутников (рис. 1) относительно поверхности Земли является следствием комбинации орбитальной плоскости спутника и вращения Земли. Стрелка указывает путь ИСЗ, более светлая полоса – зона охвата измерениями приборами спутника. Ширина сканирования до 3000 км (<http://aqua.nasa.gov/>).



*Рис. 1. Орбитальная дорожка полярных спутников наблюдения за окружающей средой [6].*

Почвенная влага является важной агрометеорологической характеристикой. Оценка почвенной влаги на больших территориях очень важна в метеорологии, гидрологии и сельском хозяйстве. С помощью сверхвысокочастотного дистанционного зондирования можно получить информацию о почвенной влаге при практически любых погодных условиях и определить состояние почвы под умеренным растительным покровом (за исключением кустарниковой и лесной растительности). Способность датчика определять почвенную влагу основана на разнице в значениях диэлек-

трической постоянной для сухой (меньше 2,5) и влажной (выше 80) почв. Эта разница является причиной изменения коэффициентов излучения в пределах от 0,9 для сухой и менее 0,6 для насыщенной влагой почвы. В основу метода дистанционного радиометрического определения влажности почвы положено измерение мощности потока, восходящего от почвенного покрова, излучения в микроволновом диапазоне электромагнитных волн. Количественно мощность излучения характеризуется яркостной температурой ( $T_y$  – *Brightness Temperature*). С увеличением влажности почвы уменьшается значение яркостной температуры

$$T_y = \varepsilon T_s,$$

где  $T_y$  – яркостная температура;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения поверхности;  $T_s$  – физическая температура поверхности [4]. Значения яркостной температуры зависят также от характеристик почвы, растительного покрова и шероховатости поверхности, но доминирующим фактором остается влажность почвы.

В настоящее время в Казахстане Институтом космических исследований МОН РК разработаны методы тематической обработки спутниковых данных, с помощью которых, начиная с 2002 года, Министерству сельского хозяйства РК оперативно поставляется информация о весенних запасах влаги в почве.

В данной работе были проанализированы данные яркостной температуры пассивного радиометра AMSR-E (6,9 ГГц) полярного спутника AQUA для территории Казахстана. AQUA был запущен NASA (National Aeronautics and Space Administration) в рамках Программы наблюдения за Землей (Earth Observation System (EOS)) 4 мая 2002 года и обращается на высоте 705 км. На борту спутника установлены шесть приборов, часть из которых предназначена для изучения свойств облачного покрова и определения температуры воды в морях, другая – для определения температуры атмосферы Земли и ее влажности ([www.dvgu.ru/meteo/.../SatellitH.htm](http://www.dvgu.ru/meteo/.../SatellitH.htm)).

Радиометр AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer – EOS) является одним из шести приемников AQUA. Пассивный радиометр имеет 12 каналов и измеряет яркостные температуры уходящего (микроволнового) излучения Земли на частотах 6,9; 10,65; 18,7; 23,8; 36,5 и 89,0 ГГц при вертикальной и горизонтальной поляризации волн в полосе шириной 1450 км [5].

Данные AMSR-E распространяются в формате HDR в виде изображений и имеют систему координат EASE-GRID (Equal-Area Scalable

Earth Grid) и широко используются для оценки влажности почв. AMSR-E измеряет отраженное излучение земной поверхности в микроволновой области электромагнитного спектра, интенсивность которого характеризуется яркостной температурой ( $T_y$ ), называемой также радиояркостью (radio brightness). Для расчета влажности почв, кроме температурной яркости, используется также диэлектрическая постоянная и температура поверхности почвы. Оптимальным диапазоном исследования влажности почвы является диапазон 1...10 ГГц. AMSR-E имеет канал на частоте 6,9 ГГц с грубым пространственным разрешением (около 50 км). Такое разрешение дает общую картину пространственного распределения влажности почвы, но не позволяет вести мониторинг этого показателя на относительно небольших по площади территориях.

В статье рассмотрены ежедневные спутниковые данные AMSR-E по яркостной температуре ( $T_y$ ) и почвенной влаге; наземные данные семи станций Казахстана по осадкам и влаге в слое почвы 10 см за период май – август 2002...2007 гг. Использовались результаты дистанционного зондирования почвенной влаги за интервал времени суток с 18:00 до 06:00 часов, так как в это время влагосодержание и температура почвы меняются незначительно. В течение дневного времени температура поверхности почвы быстро меняется, и верхний слой почвы становится сухим независимо от влагосодержания нижних слоев. В результате поверхностный слой больше не взаимодействует с последующими нижними слоями почвы. Другой фактор – в ночное время происходят сравнительно небольшие изменения температуры поверхности почвы, в особенности в июне – августе, поэтому температура воздуха и поверхности почвы практически одинаковые. Это делает измерения  $T_y$  более чувствительными к излучению и уменьшает их зависимость от приземной температуры. С другой стороны, дневные наблюдения будут зависеть не только от физических характеристик и предыдущих условий, но также от характера высушивания и нагревания почвы в течение дня.

Низкие частоты наиболее чувствительны к влажности почвы и менее чувствительны к растительному покрову, шероховатостям поверхности и влагосодержанию атмосферы.

На рис. 2 показаны распределения значений яркостной температуры на частотах 6,6; 10,6 и 18 ГГц при вертикальной ( $V$ ) и горизонтальной ( $H$ ) поляризации. Чувствительность яркостной температуры к влажности

почвы уменьшается с увеличением частоты (рис. 2а) и увеличивается к содержанию влаги в растительном покрове (рис. 2б). Из этого следует, что чувствительность  $T_{я}$  к влажности почвы уменьшается с увеличением растительного покрова. Низкие частоты (6,9 ГГц) горизонтальной поляризации наиболее чувствительны к состоянию почвы под умеренным растительным покровом. Необходимо заметить, что чувствительность уменьшается с увеличением растительного покрова, и существует малая чувствительность к содержанию влаги в растительном покрове, если она составляет более  $1,5 \text{ кг/м}^2$ , даже на частотах 6,6 ГГц (рис. 2б). Поэтому в работе использовалась частота 6,6 ГГц горизонтальной поляризации.

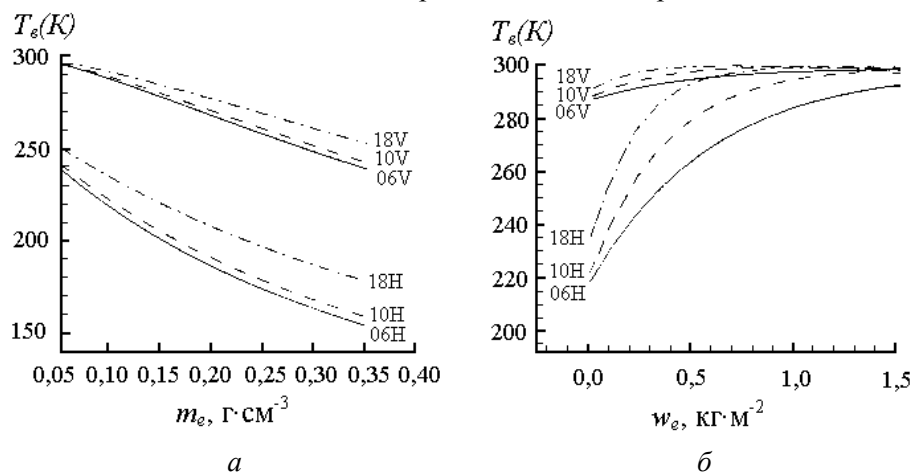


Рис. 2 Яркостная температура, рассчитанная на частотах 6,6; 10 и 18 ГГц как функция. а - влажности почвы ( $m_e$ ), б - содержания влаги в растительном покрове ( $w_e$ ) при вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризации. [1].

Вегетация является наиболее важной частью экосистемы местности. Климат оказывает влияние на вегетацию, изменяет его производительность и распределение. Долгосрочные средние параметры наряду с почвенными и географическими характеристиками определяют, в основном, объем и тип вегетации в регионе. В краткосрочном разрезе изменения в вегетации в основном обуславливаются режимом погоды. Вегетация реагирует также на экологические изменения через перераспределение энергии и воды внутри атмосферно-вегетационно-почвенного континуума. Существует несколько индексов, которые являются подходящими спутниковыми индикаторами вегетационного состояния, включая стресс, вызванный засухой. Тем не менее, параметры, основанные на радиометрии очень высокого разрешения (РОВР) отражают комбинированное воздействие экологии (включая климат и другие факторы с долгосрочными воздействиями) и погоды на вегетацию.

Первые непосредственные индексы были модифицированы для отражения состояния и условия вегетации, так как сигналы погоды являются слабее, чем экологические и их нелегко обнаружить [3].

При выявлении состояния растительности, обычно используют вегетационные индексы, которые являются линейными или дробно-линейными комбинациями двух спектральных каналов: 0,6...0,7 мкм (красный диапазон спектра) и 0,8...0,9 мкм (ближний инфракрасный (ИК) диапазон спектра). Выбор этих спектральных каналов обусловлен тем, что в красном диапазоне спектра растительность имеет наименьшее отражение, а в ближнем ИК-диапазоне спектра – самое высокое отражение по сравнению с другими природными объектами. То есть, для растительности в хорошем состоянии характерно падение спектральной кривой в красном диапазоне и резкий подъем в ближнем ИК - диапазоне. Вегетационные индексы описаны во многих работах и были успешно использованы разными авторами. Нормализованный вегетационный индекс (NDVI) представляет собой разность значений ближнего ИК и красного каналов, деленную на сумму этих значений и является наиболее устойчивым к разным факторам: типу съемочной аппаратуры, высоте Солнца и углу сканирования спутника, плотности атмосферы и др. Значения NDVI изменяются в пределах от минус 1 до плюс 1 [4]. Сравнивая значения NDVI двух или более лет съемки, можно определить ухудшение или улучшение состояния растительности.

Для определения степени покрытия растительностью различных регионов Казахстана в работе использовались месячные карты NDVI полярного спутника NOAA/AVHRR для периода с мая по август за 2002 год. Получено, что NDVI меньше 0,4 (вегетация умеренная), в центральной части Казахстана и значения NDVI больше 0,4 на севере и юго-востоке страны. Так как растительный покров имеет высокое излучение в сверхвысоко частотном (СВЧ) спектре, то такие регионы показывают высокое значение  $T_y$  даже для пропитанной влагой почвы. Поэтому при интерпретации данных по  $T_y$  для определения условий увлажнения почвы необходимо учитывать информацию о растительном покрове. По этой причине были выбраны регионы Казахстана с умеренным растительным покровом.

В табл. представлены максимальные и минимальные значения яркостной температуры по семи станциям за период май – август 2002...2005 г. Разница между максимумом и минимумом, за исключением М Казыгурт, составляет более 30 °К. Это определяет высокую чувствительность  $T_y$  к условиям увлажнения почвы.

Максимальные и минимальные значения яркостной температуры (°K) за период май – август 2002...2005 гг.

Метеостанция	Максимум	Минимум
Комсомольское	267,8	217,7
Казыгурт	270,4	248,0
Дмитриевка	272,2	236,5
Аркалык	270,2	225,9
Аккум	268,2	227,5
Есиль	271,0	214,2
Казталовка	270,0	230,1

Для всех семи станций построены диаграммы рассеяния наземных и спутниковых данных по влажности почвы, а также рассчитаны коэффициенты корреляции. В качестве примера на рис. 3 приведены данные по М Комсомольская, где коэффициент корреляции составил 0,53. Однако хорошая связь присутствует не на всех станциях.

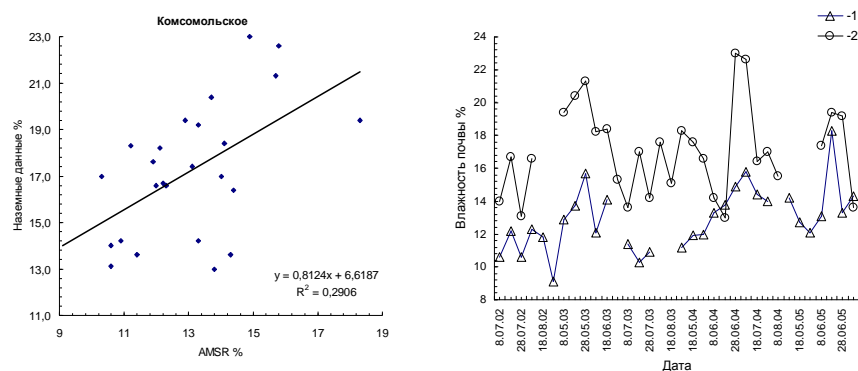


Рис. 3. График связи (слева) и сравнительный временной ход (справа) спутниковых и наземных данных по влажности почвы (в %) для М Комсомольское за период май – август 2002...2005 гг.  
1 - AMSR-E, 2 – наземные данные.

Несоответствие наземных и спутниковых данных может быть связано с тем, что AMSR-E представляет данные только по поверхностному слою почвы, а наземные на глубине 10 см. График временного хода наземных данных и данных AMSR-E также показывает хорошее соответствие между ними, но данные AMSR-E не имеют таких больших колебаний, как наземные данные.

На рис. 4 показано сравнение данных AMSR-E по яркостной температуре и влажности почвы с наземными данными по влажности почвы М Комсомольское и М Казыгурт. Спутниковые и наземные данные по влажности почвы хорошо согласуются с данными по яркостной темпера-

туре. При уменьшении значений влажности почвы увеличиваются значения яркостной температуры, и наоборот. Изменение яркостной температуры определяется изменением содержания почвенной влаги.

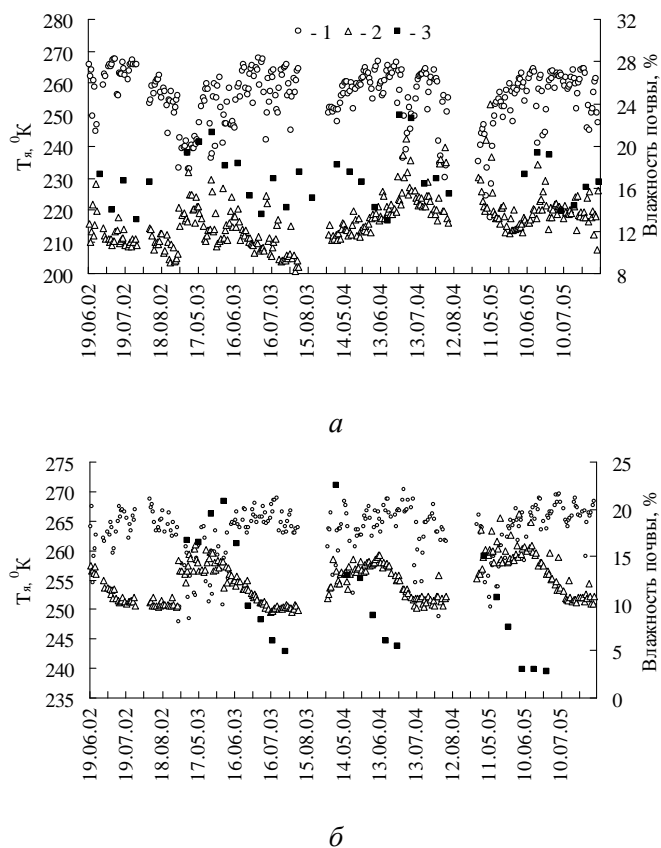


Рис. 4. Временные ряды спутниковых данных по  $T_{я}$ , и влажности почвы и наземные данные по влажности почвы. а - М Комсомольское, б - М Казыгурт за период май – август 2002...2005 гг.. 1 -  $T_{я}$  6,9 ГГц (H-pol), 2 – влажность почвы (AMSR – E), 3 – влажность почвы (наземные данные).

Далее была рассмотрена возможность использовать ежедневные данные по  $T_{я}$  и количеству осадков для мониторинга засух (рис. 5).

Продолжительному периоду с обильными осадками соответствуют низкие значения  $T_{я}$  и наоборот, высокие значения  $T_{я}$  определяют засушливый период. Значения  $T_{я}$  для засушливого периода варьируют от 260...270 °K, тогда как влажный период имеет значения  $T_{я}$  меньше, чем 250 °K. Определение соответствующих пределов яркостной температуры



для засушливого периода может помочь охарактеризовать условия засушливости над определенным регионом.

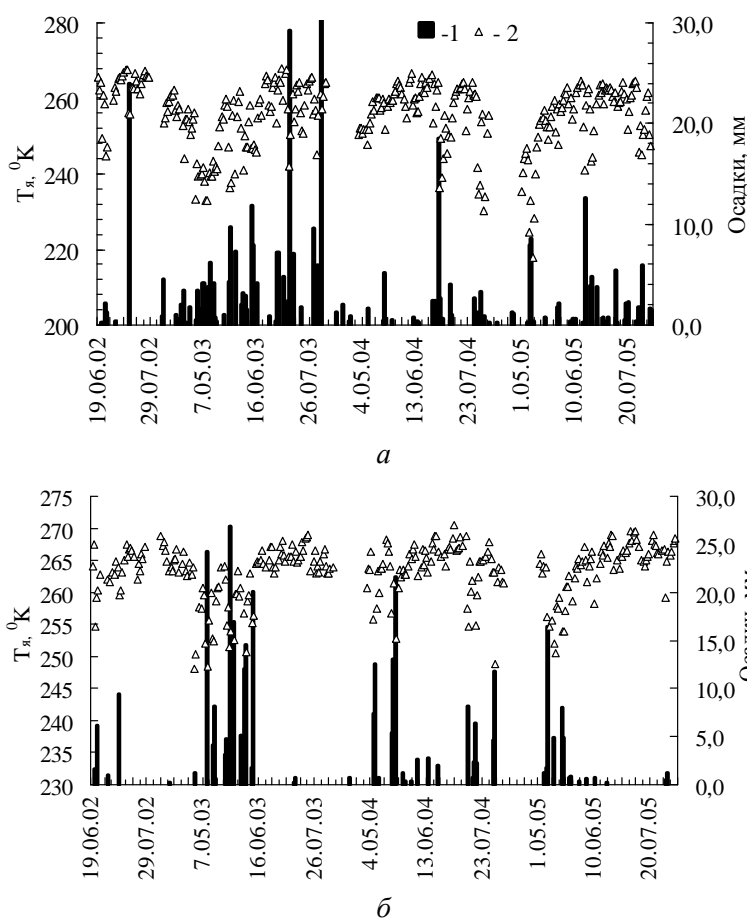


Рис. 5. Временные ряды спутниковых данных по  $T_{я}$  и наземных данных по осадкам. а - М Комсомольское; б - М Казыгурт за период май – август 2002...2005 гг. 1 – осадки, 2 –  $T_{я}$  6,9 ГГц (H-pol).

Изменения значений или аномалий  $T_{я}$  могут характеризовать изменения количества осадков или аномалий над соответствующим регионом. Для определения засушливых регионов и периодов засух были построены карты аномалий яркостной температуры (недельные, месячные и сезонные). Для расчета климатических характеристик яркостной температуры были использованы данные за 6 лет (2002...2007 гг.). Для того, чтобы определить, отражают ли аномалии яркостной температуры аномалии количества осадков или влажности почвы, были рассчитаны значения аномалий недельных сумм осадков и влажности почвы по данным

AMSR - E. На рис. 6 представлена диаграмма рассеяния недельных аномалий  $T_{я}$  и осадков, а также недельных аномалий  $T_{я}$  и почвенной влаги для М Комсомольское. На диаграмме видно, что большинству значений негативной аномалии количества осадков соответствуют значения позитивной аномалии яркостной температуры, и наоборот. Связь между  $T_{я}$  и почвенной влагой выражена слабее. О причинах этого было сказано выше.

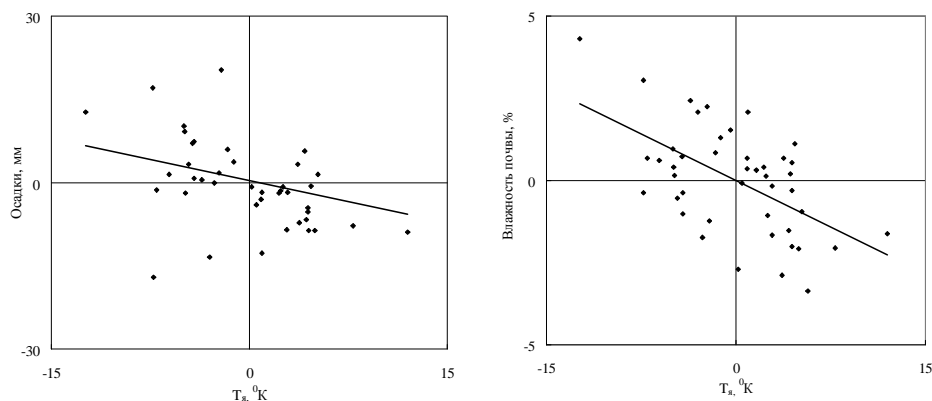
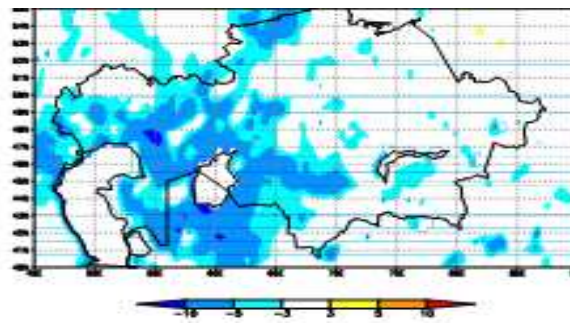


Рис. 6. Диаграмма аномалий яркостной температуры и осадков (слева) и аномалий яркостной температуры и влажности почвы (справа) для М Комсомольское за период с мая по август 2002...2005 гг.

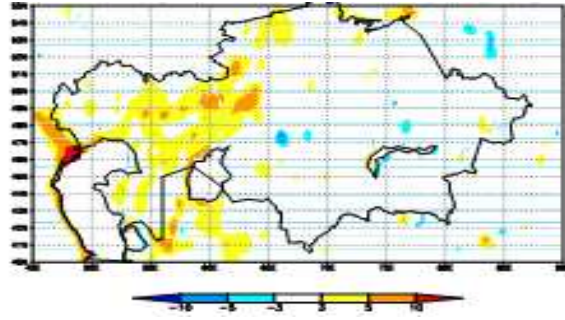
Следовательно, можно сказать об удовлетворительной корреляции аномалий яркостной температуры с аномалиями осадков. Карты аномалий яркостной температуры могут использоваться для определения засушливых регионов в различных временных шкалах. В данной работе посчитаны недельные, месячные и сезонные аномалии  $T_{я}$  для территории Казахстана за 6 лет.

На рис. 7 в качестве примера представлены карты сезонных аномалий яркостной температуры. Наиболее влажным годом является 2003 г. (негативная аномалия), тогда как в 2006 г. по позитивной аномалии хорошо определяются засушливые районы.

Месячные аномалии  $T_{я}$  (рис. 8) также подтверждают, что в мае – июне 2003 г. и мае 2007 г. был влажный период (негативные аномалии  $T_{я}$ ). Регионы с засушливым периодом (положительные аномалии  $T_{я}$ ) определяются в мае 2004 года, а также в мае – июне 2006 г.

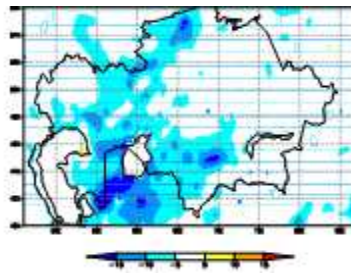


*a*

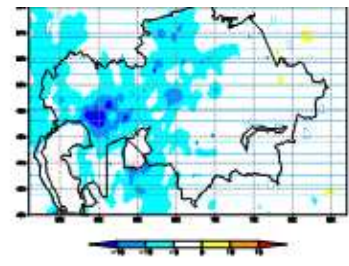


*б*

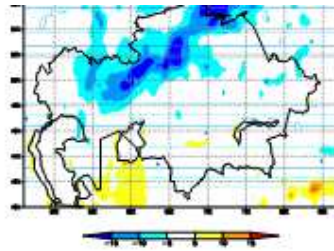
*Рис. 7. Сезонные аномалии (май – август) яркостной температуры на территории Казахстана. а - 2003 г., б – 2006 г.*



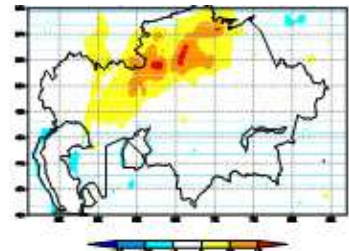
*а*



*б*



*в*



*г*

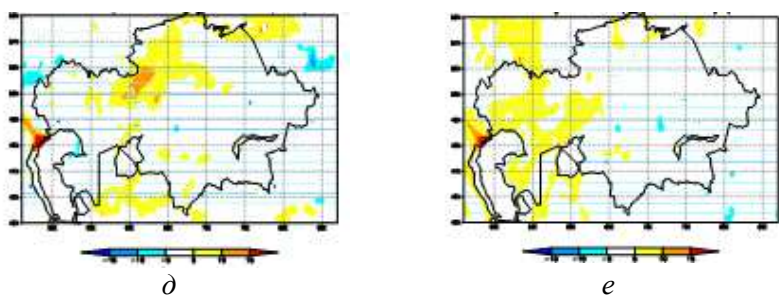
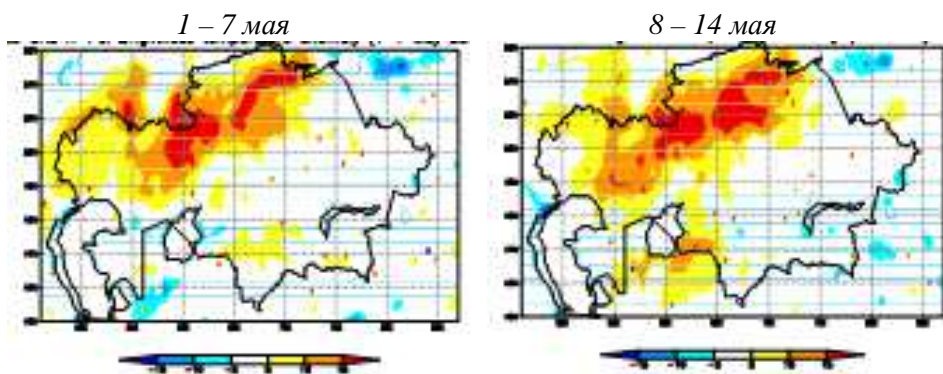
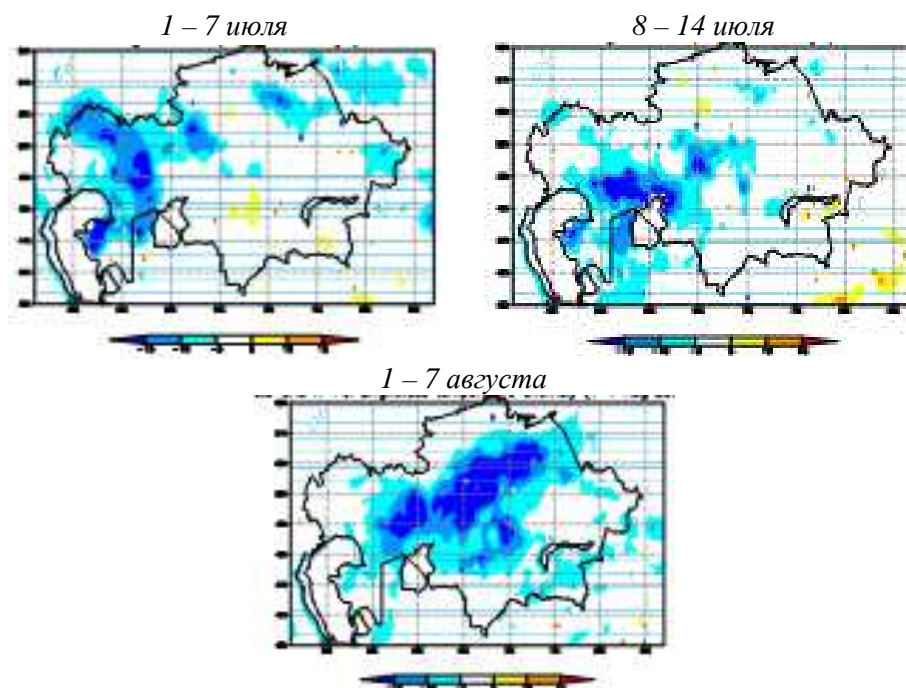


Рис. 8. Месячные негативные аномалии яркостной температуры на территории Казахстана за 2003 г. а – май, б – июнь и 2007 г. в - май, а также месячные положительные аномалии за 2004 г. г – май и 2006 г. д – май, е – июнь.

Таким образом, для выявления регионов с засушливыми и влажными периодами можно использовать аномалии яркостной температуры поверхности.

Временное распределение осадков наиболее важно для урожая при различных фазах цветения и роста растений и необходимо для определения условий засушливости за короткий период (примерно за неделю). Для этих целей посчитаны недельные аномалии  $T_n$  за период 2002...2007 гг. (май – август). По этим картам можно определить условия увлажнения по неделям за соответствующий месяц и год. На рис. 9 в качестве примера представлены карты недельных аномалий яркостной температуры в периоды наиболее засушливых (1...14 мая) и наиболее влажных условий (1...14 июля, 1...7 августа) 2004 г. Данные радиометра AMSR-E показали хорошую корреляцию с данными по осадкам (показатель почвенной влаги) на территории Казахстана.





*Рис. 9. Недельные аномалии яркостной температуры на территории Казахстана за 2004 г.*

Проведенное исследование показало, что использование спутниковых данных, в частности яркостной температуры, может способствовать улучшению пространственного мониторинга влажности почвы на территории Казахстана и раннему выявлению возможности возникновения засухи. Однако эти результаты должны верифицироваться с фактическими условиями засушливости территории Казахстана.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заболотских Е.В., Митник Л.М., Бобылев Л.П., Йоханнессенн О.М. Нейронно-сетевые алгоритмы восстановления параметров системы океан-атмосфера по данным микроволнового спутникового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. / Под ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. – М.: Изд-во Полиграф, 2004. – С. 447-458.
2. Коган Ф.Н. Дистанционный сбор данных о воздействии погоды на вегетацию в не гомогенных районах, Им Дж., Дистанционный сбор данных., 1990.11, С. 1405-1419.

3. Коган Ф.Н. Глобальное наблюдение за засухой из космоса. // Бюлл. Амер. Мет. Об. – 1997. – Вып. 78. – С. 621 – 636.
4. Joseph G. Fundamentals of remote sensing. / Second edition. – 2008. – PP. 29-113.
5. Njoku E.G., Li Li Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6 – 18 GHz. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. 1999. – № 37, PP. 79-93.

РГП «Казгидромет», г. Алматы,

Центр применения космических технологий (SAC), г. Ахмедабад, Индия

**СПУТНИКТИК МӘЛІМЕТТЕРДІ ҚАЗАҚСТАН АУМАҒЫНДАҒЫ  
ТОПЫРАҚТЫҢ ШӨЛДЕНУ МОНИТОРИНГІНДЕ  
ҚОЛДАНУ МҮМКІНДІГІ**

Р.М. Илякова

П.К. Таплиял

AQUA серігінің бортында орналасқан, AMSR-E радиометрмен өлшенген жарықтық температурасы мен топырақ ылғалдығы туралы квази-синхрондық мәліметтерге және Қазақстанның жеті метеорологиялық станцияларының: Комсомольское, Қазығұрт, Дмитриевка, Арқалық, Аққұм, Есіл, Казталовканың 2002 ...2007 жылдардың мамыр мен тамыз аралығындағы топырақ ылғалдылығы мен жауын – шашын мәліметтеріне салыстырмалы талдау, спутниктік мәліметтерді топырақтық шөлдену мониторингінде қолдану мүмкіндіктерін бағалау мақсатында жасалынды. Жарықтық температураны қолдану топырақ ылғалдылығының мониторингін жақсартуға және шөлдің пайда болуын алдын – ала анықтауға мүмкіндік береді.