

УДК 551.501.86

Канд. геогр. наук

А.М. Кауазов^{1,2}А.Н. Нурлан³А.Е. Жолдасбек²А.С. Бозбекова²

**ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ МОДЕЛИ
NOAH / GSFC В РАМКАХ ПРОЕКТА FEWSNET/USGS / EROS ДЛЯ
ОПЕРАТИВНОГО ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
В СЕВЕРНОМ КАЗАХСТАНЕ**

Ключевые слова: снежный покров, водный эквивалент, модель Noah, влагозапас, метеостанция

В статье представлена оценка возможности применения данных модели Noah в рамках проекта FEWS NET / USGS / EROS для оперативного гидрологического прогнозирования. В работе использовались данные Центра космических полетов НАСА им. Годдарда (США) и данные наземных метеостанций. Представлены статистические оценки соответствия данных, рассчитан коэффициент корреляции, показавший невысокую связь и равный 0,4, выявлены недостатки модельных данных и ошибки определения водного эквивалента, достигающих больших абсолютных и относительных значений. Сделан вывод о том, что модельные данные не пригодны для оперативного прогнозирования в Северном Казахстане и могут быть использованы в горных районах или только для сравнительного анализа пространственно-временных отклонений.

Введение. Казахстан относится к странам с резко континентальным климатом. В северной половине республики продолжительность холодного периода составляет около полугода. Что создает условия для формирования устойчивого снежного покрова и его накопления. Снежный покров является аккумулятором всех осадков за

¹РГП «Казгидромет», г. Нур-Султан, Казахстан

²КазНУ им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

³РГП «Казэронавигация», г. Алматы, Казахстан

зимний период, и источником влаги в весенний период. Запас воды в снежном покрове (SWE) определяет общее количество воды, которая весной будет доступна. Таяние снега обеспечивает весенний влагозапас почвы, который играет важную роль в посевной период и в ранние сроки вегетации, так как недостаточное количество снега становится причиной весенних засух. В то же время весеннее таяние снега обуславливает паводки, риски наводнений и ЧС. При этом обе эти задачи в области сельского хозяйства и ЧС, являются обратными друг другу и могут быть решены только при решении одной из них. Однако, эти задачи не могут быть решены полностью без определения исходной информации – точного количества водного эквивалента в снежном покрове. В этой связи изучение возможности гидрологического прогнозирования представляет значительную важность и определяет высокую актуальность исследования.

Прогнозирование как стока, так и запасов влаги в почве представляет значительную сложность и интерес. Фактические сведения о запасе воды в снежном покрове традиционно получают на основе маршрутных снегомерных наблюдений. Такие измерения являются самыми точными и репрезентативными, но в силу трудоемкости данного процесса они не могут обеспечить требуемую детализацию по времени (не реже одного измерения в сутки) и оперативность предоставления информации, необходимую для использования в современных технологиях численного прогноза погоды. Кроме того, их выполнение ограничено в пространстве. Таким образом, ежедневный пространственный мониторинг запасов воды в снежном покрове, необходимый также для оценки региональных климатообразующих факторов, представляет актуальную задачу.

В виду объективной сложности как самого объекта – снежного покрова, так и условий – тип весны, типы почв и рельефа, проблема так и не решена с приемлемой точностью.

Вместе с тем, в последнее время большое распространение получили данные дистанционного зондирования, беспилотники, ГИС и средства обработки геопространственных данных. В настоящее время активно развиваются два направления, позволяющие получать информацию о состоянии характеристик снежного покрова:

1) на основе данных искусственных спутников Земли и методов их интерпретации;

2) с помощью технологий численного прогноза погоды со встроенными системами циклического усвоения данных, с помощью искусственных спутников Земли.

Одной из главных проблем для получения информации о SWE по данным дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) является то, что излучению / сигналу требуется проникновение сквозь поверхность снега и исследование свойств всей глубины снежного покрова. Современные технологии дистанционного зондирования для SWE включают измерения ослабления гамма-излучения, испускаемого почвой под снегом, пассивное или активное микроволновое излучение и различные методы оценки глубины снежного покрова, которая затем умножается на известную или предполагаемую плотность. В грубых пространственных и временных масштабах SWE может быть определен путем обнаружения незначительных изменений силы тяжести Земли. К сожалению, ни одна из этих технологий не достигла состояния производственной готовности, точности и надежности.

Другая проблема заключается в том, что высота снежного покрова и SWE значительно меняются в течение зимы. Неглубокий снежный покров с низкой плотностью в октябре имеет мало общего с глубоким и плотным снегом весной. Кратковременные погодные явления, такие как сильный ветер, снегопад или интенсивное солнечное излучение, могут изменить характеристики снега всего за несколько часов. Поэтому, недостаточно иметь немногочисленные и нечастые измерения, требуется мониторинг с высокой частотой измерений.

На современном этапе прогнозирование опирается на данные моделирования численных прогнозов погоды (ЧПП). Физико-математические модели динамики снежного покрова рассмотрены в [1, 2]. Анализ мирового опыта применения различных моделей снежного покрова в практике гидрологического прогнозирования представлен в Руководстве по гидрологической практике [3], а также Руководстве ВМО по прогнозированию паводков [4].

Перспективной для адаптации является модель динамики снежного покрова SNOW-17, разработанная в Национальной службой погоды США [5]. Данная модель хорошо зарекомендовала себя в практике оперативного гидрологического прогнозирования США, а также других стран. В

качестве входных параметров модели используются всего две переменные температура воздуха и сумма осадков. В настоящее время одними из самых доступных являются данные модели Noah в рамках проекта FEWS NET / USGS / EROS.

Однако эти данные не были верифицированы или откалиброваны на территории Казахстана. Поэтому представляет большой научный и практический интерес провести сравнение фактических данных и данных Центра космических полетов НАСА им. Годдарда / USGS / EROS и оценить их точность и возможность использования для оперативного прогнозирования влагозапасов снежного покрова в весенний период на основе спутниковых данных.

Цель данного исследования заключается в изучении возможностей использования данных модели Noah / GSFC для оперативного гидрологического прогнозирования.

Использованные данные. В 1985 году Агентство США по международному развитию (USAID) создало Систему раннего предупреждения о голоде (теперь официально известную как Сеть системы раннего оповещения о голоде, или FEWS NET) [6].

Центр данных USGS / EROS (EDC) работает с USAID, Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (NASA), Национальным управлением по океану и атмосфере (NOAA) и Chemonics International (Chemonics) для предоставления данных, информации и анализов, необходимых для проекта FEWS NET. NASA и NOAA собирают и обрабатывают спутниковые данные, которые используются для мониторинга состояния растительности (Нормализованный разностный индекс растительности или NDVI), осадков (Rain Fall Estimate, или RFE) и других параметров, включая снежный покров.

Данные SWE в настоящее время обрабатываются для FEWS NET в Центре космических полетов НАСА им. Годдарда (GSFC) с использованием LIS версии 7 с LSA версии 3.6.1 LSM. Эта модель моделирует важные процессы биогеофизического, гидрологического и энергетического баланса, которые происходят на поверхности, предлагая физически обоснованный подход к моделированию снега [7].

Noah 3.6.1 работает с пространственным разрешением 1 км и временным разрешением в полчаса, используя данные Глобальной системы сбора данных (GDAS) и производит выдачу результатов расчета один раз в день. Университет штата Мэриленд и GSFC предоставили несколько наборов параметров данных для моделей. Эти наборы данных параметров включают данные о поверхностных водах (MOD44w), информацию о растительности, альбедо, высоте и почве.

Программное обеспечение LIS использует билинейную интерполяцию, чтобы уменьшить масштаб данных GDAS и сеток параметров до разрешения 1 км. Он также включает в себя коррекцию с учетом склона и ориентации [8]. Объем снегозапасов рассчитывается на выходных данных из модели Noah 3.6.1 LSM в виде карты снегозапасов, предназначенной для обеспечения оценки потенциальной опасности наводнения из-за таяния снега и сезонных оценок воды, доступной для орошения. Карты влагозапасов представлены для всего региона Центральной Азии в следующем виде на рисунке 1.

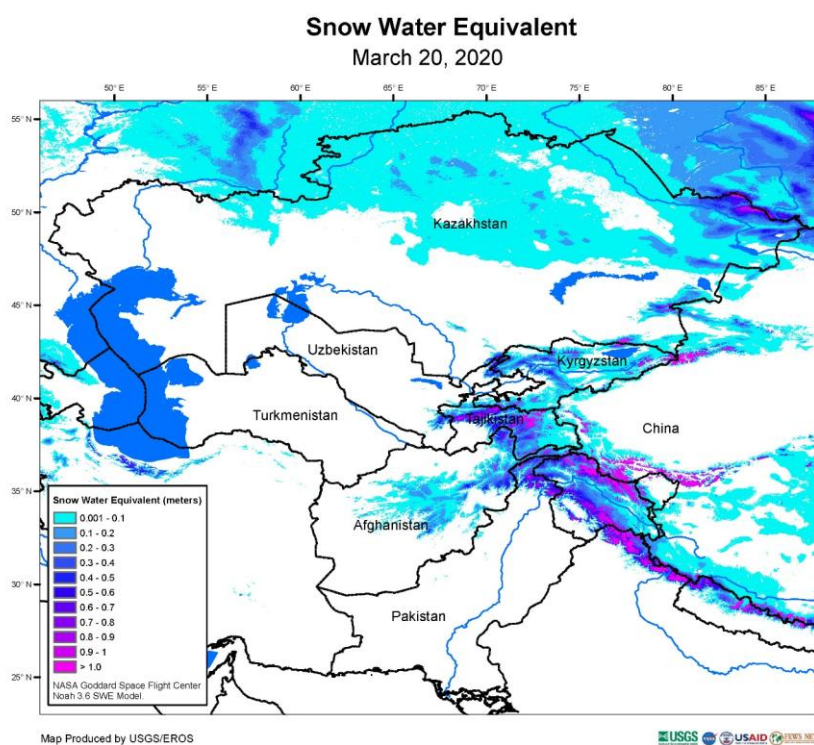


Рис.1. Пример распространяемых USGS / EROS данных о распределении водного эквивалента снежного покрова (SWE) на 20 марта 2020 года [6].

Данные о снегозапасах представлены с шагом 10 см, что соответствует 100 мм, в виде изолиний, залитых стандартным цветом.

В качестве фактических данных в данном исследовании были использованы данные с метеостанций (МС) Акмолинской, Костанайской и Северо-Казахстанской области. К анализу были привлечены имеющиеся в распоряжении данные о высоте снежного покрова (см) и плотности снежного покрова (г/см^3), на следующих МС: Аркалык, Аршалы, Егиндыколь, Жаксы, Акколь, Степногорск, Балкашино, Карасу, Рузаевка, Рудный, Щучинск, Чкалово, Сергеевка, Пресногорьковка, Петропавловск, Джетыгара за период с 2002 по 2008 год. Несмотря на то, что данные не новые, и проводился ретроспективный анализ, тем не менее, для оценки точности эти данные вполне можно использовать, так как методика их получения не менялась, также методика данных USGS / EROS оставалась постоянной. Привлеченные метеорологические станции Северного Казахстана, преимущественно расположены не в крупных населенных пунктах, которые бы искажали данные воздействием так называемой «тепловой шапки».

Методика сравнительного анализа данных USGS / EROS и фактических наземных данных. Ежедневные данные USGS / EROS были скачаны за длительный период с главного сайта проекта в формате *.pdf за период январь-апрель. Далее файлы были преобразованы в формат *.tiff. После этого, все скачанные файлы были подвергнуты процедуре геопривязки в ГИС MapInfo версии 11-17, и были организованы в слой. Кроме того, в слой были добавлены контуры области.

Также были определены географические координаты метеостанций и в ГИС пакете преобразованы в слой МС. В дальнейшем географическое положение МС было необходимо для перехода от пространственных данных к точечным.

Данные о высоте и плотности снега, координатах станций были организованы в базу данных MS Access для удобства работы с ГИС (представлены на рисунке 2), которые при необходимости экспортировались в файл MS Excel.

Из пространственных данных USGS / EROS после загрузки в ГИС проводилась точечная съемка данных, которые заносились в таблицу.

Методика съемки заключалась в визуальном осреднении влагозапасов в радиусе 10 км от МС для избежания неточности при точечных оценках.

Значение 10 км было принято как условная зона соответствия наземных измерений на МС, т.е. фактической репрезентативности данных МС на местности. При расположении МС в одной однородной зоне, точечные данные принимались как среднеарифметическое по данной градации. Например, если МС была расположена в зоне 0...100 мм, то влагозапас на ней оценивался в 50 мм. Если половина площади круга ограниченного радиусом 10 км занимала другая зона, например 100...200 мм, то влагозапас принимался как 100 мм. Соседние зоны с иными влагозапасами учитывались, но не дистанция или расстояние до них, а учитывалась их доля в круге радиусом 10 км и влагозапас, соответственно, либо увеличивался либо уменьшался.

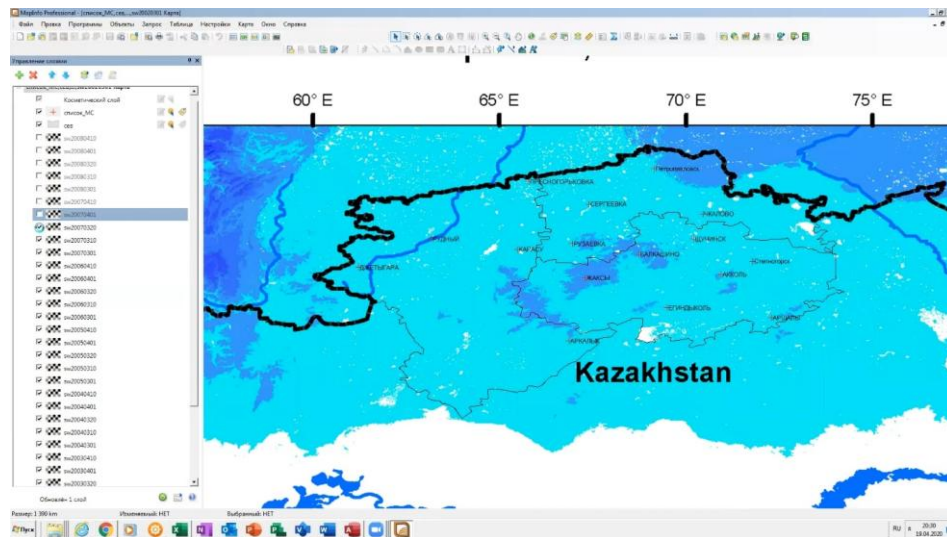


Рис. 2. ГИС-данные о высоте и плотности снега, координаты станции.

В результате получалась таблица в которой напротив каждой цифры фактических наземных данных о влагозапасах располагались осредненные пространственные данные USGS / EROS, которые затем прямо сравнивались. Запас воды в снеге (SWE) по фактическим данным рассчитывался по формуле:

$$SWE = 10hp,$$

где h – высота снежного покрова (см), p – плотность снежного покрова ($г/см^3$), 10 – множитель для перевода см в мм.

В северных районах Казахстана накопление снега идет в течение всей зимы, до самого снеготаяния и максимум высоты приходится соответственно на апрель-март. Высота и плотность это наиболее важные параметры. Произведение высоты и плотности позволяет определить SWE. Пространственная и временная изменчивость SWE по территории очень велика. При этом, эта изменчивость в немалой степени формируется за счет изменения плотности. В течение всего периода существования снежного покрова его плотность претерпевает изменения, которые обусловлены различными факторами: давление вышележащих слоев снега на нижележащие, процессы метаморфизма, оттепели и связанные с ними процессы фазовых переходов и перемещения талой воды, воздействие ветра, рельефа местности, влияния растительности, фазовый состав выпадающих осадков.

В целом плотность снежного покрова существенно меняется как в пространстве, так и во времени. Она постепенно нарастает от начала зимы к весне и достигает своего максимума в период таяния снега. Больших значений плотность может достигать в районах с высоким снежным покровом и продолжительной зимой благодаря уплотнению снега под влиянием силы тяжести. Она может быть большой также и в районах с невысоким снежным покровом, если в течение зимы наблюдаются сильные ветры, способствующие уплотнению снега, или возможны оттепели, вызывающие подтаивание снега.

Для сопоставления данных был выбран период с максимальными снегозапасами, которые в данном регионе приходятся на март. Данные были проанализированы для 20 марта каждого года начиная с 2002 по 2008 год.

Для оценки точности данных USGS / EROS и оценки связи данных был проведен сравнительный анализ с привлечением фактических наземных данных. К сожалению, не по всем станциям были данные за каждый год, например, в 2005 году данные были по 7 станциям из 14 выбранных, в 2002 по 8. А в 2009 году добавились дополнительные три МС Есиль, Киима, Кокшетау.

Обсуждение результатов. Для оценки общего соответствия данных друг другу был рассчитан коэффициент корреляции с

привлечением данных по всем имеющимся МС. Итоговое значение коэффициента корреляции оказалось не высоким 0,40 (рисунок 3).

Такого рода связь не позволяет использовать данные для прогнозирования. Тем не менее, рассмотрим данные более подробно, так как корреляция показывает прямое точечное сравнение. Расчет средних значений по всем годам и точкам, вполне ожидаемо показал высокое соответствие данных друг другу – среднее значение SWE по наземным данным 60,7 мм, а SWE по данным USGS / EROS 55,4 мм, среднеарифметическая разница 5,3 мм. При этом разброс достаточно большой – среднее абсолютное отклонение от среднего 28,5 мм. Максимальное положительное отклонение достигало 95 мм, а максимальное отрицательное отклонение достигало – 51,4 мм. Таким образом, высокое соответствие средних значений объясняется взаимной компенсацией равнозначных ошибок.

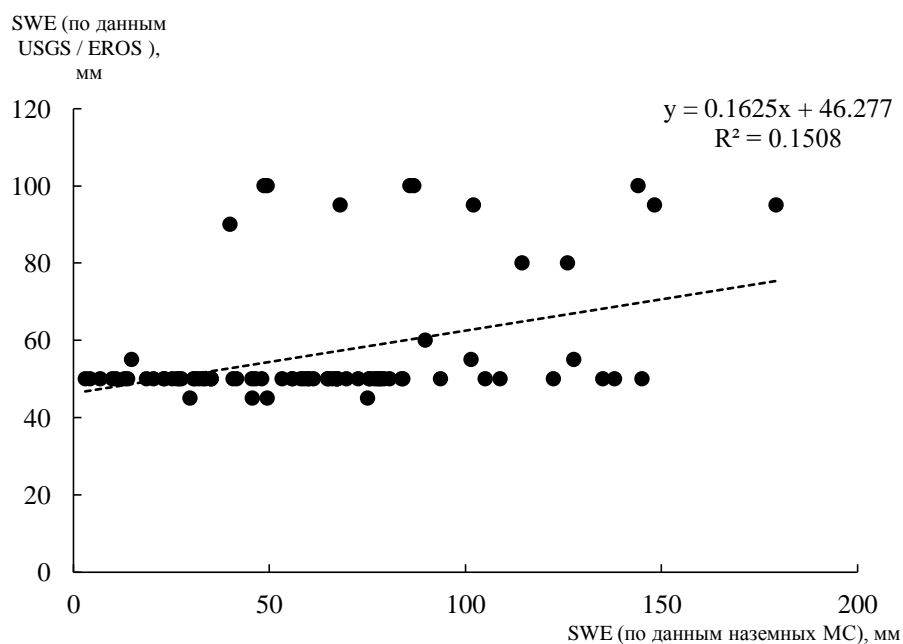


Рис.3. Связь данных USGS / EROS и фактических наземных данных.

При сравнении среднегодовых значений, результаты схожие. Хотя в отдельные годы наблюдается почти полное соответствие данных, как например в 2004 и 2009 году (рисунок 4), но в отдельные годы разброс средних значений достигает существенных величин 40 мм – в 2005 году. Данные USGS / EROS, даже осредненные, в целом, плохо отражают

межгодовую динамику изменения влагозапасов в снеге. Экстремальные значения плохо отражаются.

Сезонная изменчивость также плохо отражена на картах, например, в Северном Казахстане вся территория, как правило, лежит в одной зоне 0...100 мм, иногда появляются зоны 100...200 мм. Большое огрубление данных скрывает все пространственные неоднородности (рисунок 5).

При этом огрубление (осреднение) данных не дает положительного эффекта как при оценке точечных данных, так и при оценке осредненных по всей территории. Отклонение по отдельным годам доходит до 50%. Причем отклонение разнозначное и происходит в обе стороны, поэтому как-то учесть отклонения вводом поправки пока не представляется возможным.

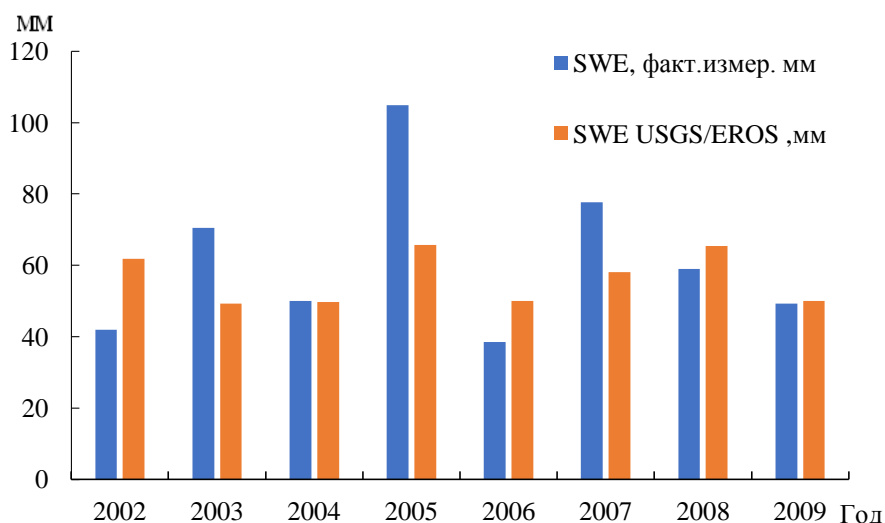


Рис.4. Среднегодовые влагозапасы по данным USGS / EROS и фактическим наземным МС. Динамика изменения осредненных значений SWE по годам.

Кроме того, сравнение площади и конфигурации заснеженной территории (SCA-snow covered area) с фактическими данными покрытия снежным покровом на основе спутниковых снимков MODIS и алгоритмов NDSI, показал значительные различия в полях снежности, как по конфигурации, так и по площади. В целом наблюдается

превышение площади, занятой снежным покровом, т.е. фактически отставание модели снеготаяния от фактических данных на несколько дней.

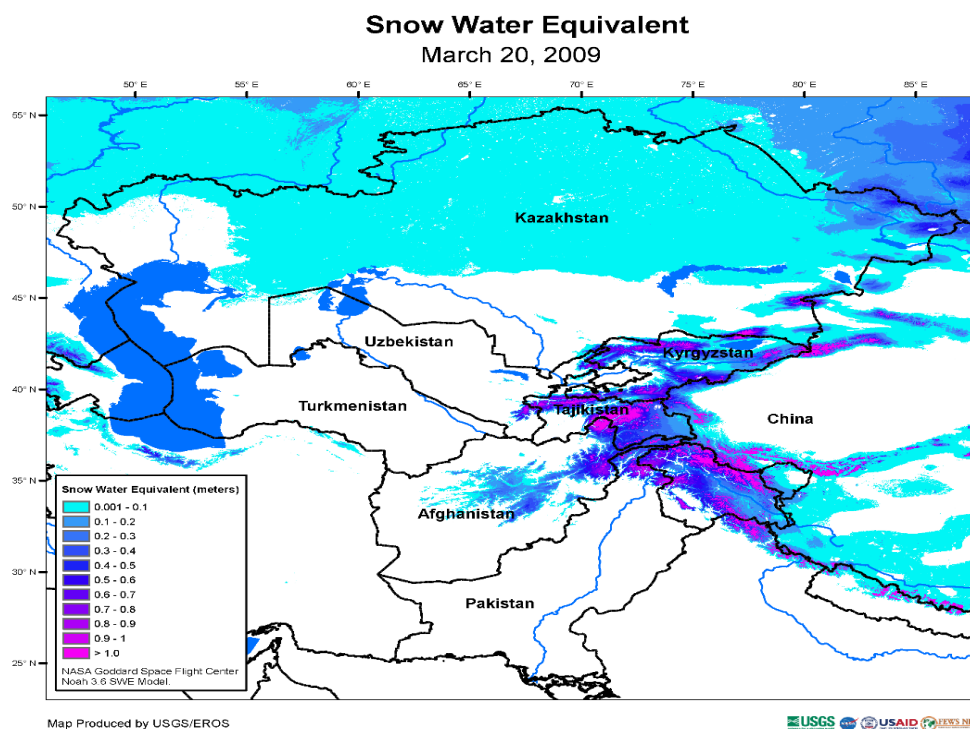


Рис.5. Однородное распределение снеготаяния по территории Казахстана.

Таким образом, данные USGS / EROS использовать в оперативной практике необходимо с осторожностью, так как абсолютные значения ошибки в оценке влагозапаса составляют большую часть его фактического количества. По-видимому, наиболее подходящая территория для использования данных USGS / EROS – горные районы, где с учетом огромных снеготаяния абсолютная ошибка в 50 мм, при общем количестве 500...1000 мм может быть не такая чувствительная. В целом, правомерно сделать вывод о том, что на равнинной территории данные USGS / EROS не существенно лучше наземных и прогноз влагозапаса с приемлемой точностью – еще не до конца решенная задача.

Заклучение. Знание SWE является ключевым для оценки распределения воды, а также для оценки риска наводнений. Сравнительный анализ данных модели Noah / GSFC с фактическими

показал, что модельные данные на равнинной территории имеют значительные ошибки. Абсолютные ошибки достигают 95 мм. Коэффициент корреляции данных модели Noah / GSFC с фактическими показал невысокое значение 0,4. Основная причина ошибок заключается в том, что модель дает некалиброванные оценки водного эквивалента снежного покрова. Данные для калибровки в настоящее время недоступны. В целом модельные данные следует использовать для сравнительного анализа, а не абсолютного сравнения сезонов и пространственного распределения. Возможно имеется потенциал для использования в горных районах.

В настоящее время нет подходящего инструмента, который позволил бы получить данные о SWE с приемлемой точностью и решить производные задачи прогноза стока и запасов влаги в почве. Однако, данные направления имеют резерв для своего развития в случае применения калибровочных данных или адаптации модели для условий Казахстана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. – М.: Академия, 2010. – 304 с.
2. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 2. – С. 76–88.
3. Портал данных проекта FEWSNET / USGS / EROS. [Электронный ресурс]. – <https://earlywarning.usgs.gov/fews/> [06. 10. 2020].
4. Anderson E.A. Snow accumulation and ablation model – SNOW-17 // NOAA Technical Report. – 2006. – 61 p.
5. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168: sixth edition. – 2009. – 302 p.
6. Kumar, Sujay V., et al. Land Information System – An Interoperable Framework for High Resolution Land Surface Modeling. *Environmental Modelling and Software* 21 (2006). – Pp. 1402-1415.

7. Kumar, Sujay V., et al. Multiscale evaluation of the improvements in surface snow simulation through terrain adjustments to radiation. // *Journal of Hydrometeorology*. – 14.1 (2013). – Pp. 220-232.
8. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. – 2011. 142 p.

Поступила 08.10.2020

Геогр. ғылымд. канд.

А. М. Кауазов
А.Н. Нурлан
А.Е. Жолдасбек
А.С. Бозбекова

**СОЛТҮСТІК ҚАЗАҚСТАНДЫ ОПЕРАТИВТІ ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ
БАҒАЛАУ ҮШІН FEWS NET / USGS / EROS ЖОБАСЫ
ШЕҢБЕРІНДЕ NOAH / GSFC МОДЕЛІНІҢ МӘЛІМЕТТЕРІН
ҚОЛДАНУ МҮМКІНДІГІ**

Түйін сөздер: қар жамылғысы, судың эквиваленті, Noah моделі, ылғал мөлшері, метеостанция

Мақалада Noah моделінің деректерін FEWS NET / USGS / EROS жобасы шеңберінде жедел гидрологиялық болжау үшін пайдалану мүмкіндігі келтірілген. Жұмыста Годдард (АҚШ) атындағы ғарыштық ұшу орталығының деректері және жер бетіндегі метеостанцияларының мәліметтері пайдаланылды. Деректердің сәйкестігінің статистикалық бағалары ұсынылған, корреляция коэффициенті есептелді, ол 0,4-ке тең әрі төмен байланысты көрсетті, модельдік деректердің кемшіліктері мен үлкен баламалы және салыстырмалы мәндерге жететін су эквивалентінің қателіктері анықталды. Үлгі мәліметтер Солтүстік Қазақстанда жедел болжауға жарамсыз деген қорытындыға келді және таулы аймақтарда немесе салыстырмалы-уақытша ауытқуларды талдау үшін ғана қолдануға болады.

A.M. Kauazov, A.N. Nurlan, A.E. Zholdasbek, A.S. Bozbekova

**POSSIBILITY OF USING DATA FROM THE NOAH/ GSFC MODEL IN
THE FRAMEWORK OF THE FEWS NET/USGS / EROS PROJECT
FOR OPERATIONAL HYDROLOGICAL FORECASTING IN
NORTHERN KAZAKHSTAN**

Keyword: snow cover, water equivalent, NOAH model, moisture reserve, weather station.

The article presents an assessment of the possibility of using data from the NOAA model in the framework of the FEWS NET/USGS / EROS project for operational hydrological forecasting. The work used data from the space flight center Goddard (USA) and data from ground-based weather stations. Statistical estimates of data compliance are presented, the correlation coefficient is calculated, which shows a low correlation and is equal to 0,4, the shortcomings of model data and errors in determining the water equivalent reaching large absolute and relative values are revealed. It is concluded that the model data are not suitable for operational forecasting in Northern Kazakhstan and can be used in mountainous areas or only for comparative analysis of spatial and temporal deviations.