

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОДНОГО БАЛАНСА ДЛЯ СУХОЙ СТЕПИ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ МЕЖДУНАРОДНОЙ МОНИТОРИНГОВОЙ СЕТИ

Р. Майсснер¹, А.А. Бондарович², В.В. Щербинин², Е.В. Понькина², А.В.Мацюра², А.В. Пузанов³,
Х. Рупп¹, Г. Шмидт⁴, Э. Штефан⁴, П. Иллигер⁴, М. Фрюауф⁴, Н.Ф. Харламова², В.П. Галахов³,
Д.Н. Балькин³ Н.В. Рудев⁵

¹Центр исследования окружающей среды им. Гельмгольца, департамент физики почв, лизиметрические станции,
39615, Фалькенберг, Альтмеркские Висче 55, ralph.meissner@ufz.de

²Алтайский государственный университет, 656049, Барнаул, пр-т Ленина, 61, bondarovich@geo.asu.ru

³Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, puzanov@iwep.ru

⁴Институт наук о Земле и географии, Университет Мартина Лютера Галле-Виттенберг, 06120, г. Галле,
Фон-Зекендорфф-Платц 4, eckart.stephan@geo.uni-halle.de

⁵КХ «Партнер», 656056, с. Полумки, Алтайский край, rudev.nikolaj@mail.ru

Для исследователей степной зоны, которая традиционно привлекала человека своими климатическими и почвенными ресурсами, изучение водного баланса имеет не только большое практическое значение, но и представляет интерес с позиции фундаментальной науки. В статье приведены результаты функционирования сети автоматических станций, развернутой в рамках российско-немецкого научного сотрудничества в области климатического и почвенно-гидрологического мониторинга за 2012-2015. Впервые на региональном уровне в Западной Сибири получены инструментальные данные и разработана методика расчета водного баланса почв на основе данных наблюдений автоматической метеостанции и лизиметрической станции нового поколения.

Ключевые слова: глобальные и региональные изменения климата, эвапотранспирация и водный баланс почв, геоэкологический мониторинг, Западная Сибирь.

CALCULATION OF WATER BALANCE FOR THE SOUTH DESERT AREA OF WESTERN SIBERIA BY INTERNATIONAL MONITORING NETWORK DATA

R. Meissner¹, A.A. Bondarovich², V.V. Scherbinin², E.V. Ponkina², A.V. Matsyura², A.V. Puzanov³,
H. Rupp¹, G. Schmidt⁴, E. Stephan⁴, P. Illiger⁴, M. Fruhauf⁴, N.F. Harlamova², V.P. Galahov³,
D.N. Balykin³, N.V. Rudev⁵

¹Helmholtz Centre for Environmental Research, Department of Soil Physics, Lysimeter Station, 39615, Falkenberg,
Altmärkische Wische 55, Email: ralph.meissner@ufz.de

²Altai State University, 656049, Barnaul, Lenin St., 61, Email: bondarovich@geo.asu.ru

³Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of Russian Academy of Science, 656038, Barnaul,
Molodezhnaya St., 1, Email: puzanov@iwep.ru

Citation:

Meissner, R., Bondarovich, A.A., Scherbinin, V.V., Ponkina, E.V., Matsyura, A.V., Puzanov, A.V., Rupp, H., Schmidt, G., Stephan, E., Illiger, P., Fruhauf, M., Harlamova, N.F., Galahov, V.P., Balykin, D.N., Rudev, N.V. (2016). Calculation of water balance for the south desert area of Western Siberia by international monitoring network data. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University*, 6 (2), 223–238.

Поступило в редакцию / Submitted: 20.06.2016

Принято к публикации / Accepted: 12.08.2016

crossref <http://dx.doi.org/10.15421/201652>

© Meissner & al., 2016

Users are permitted to copy, use, distribute, transmit, and display the work publicly and to make and distribute derivative works, in any digital medium for any responsible purpose, subject to proper attribution of authorship.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 License

⁴Institute of GeoSciences and Geography, Martin Luther University Halle-Wittenberg, 06120, Halle, Halle, Von-Seckendorff-Platz, 4, Email: eckart.stephan@geo.uni-halle.de

⁵CH «Partner», 656056, Village of Poluyamki, Altai Krai, Email: rudev.nikolaj@mail.ru

The study of the water balance is not only of great practical importance, but also of interest from the standpoint of basic science for the researchers of the steppe zone, which has traditionally attracted people for its climate and soil resources. The article presents the results obtained from a network of automatic stations deployed in the framework of the Russian-German scientific cooperation in the field of climate, soil, and hydrological monitoring for 2012-2015. The instrumental data were obtained and the method of soil water balance calculation was performed on the basis of data of automatic weather station observations and lysimetric stations of new generation in the conditions of Western Siberia.

Key words: global and regional climate change, evapotranspiration and soil water balance, geo-ecological monitoring, Western Siberia.

ВВЕДЕНИЕ

Кулундинская равнина представляет уникальный и репрезентативный полигон степной зоны Западной Сибири для изучения динамики природных процессов под влиянием хозяйственной деятельности. Общая площадь равнины составляет 13 млн. га, на территории России - Алтайский край (5,3 млн. га) и Новосибирская область (3,8 млн. га). На территории Казахстана (3,9 млн. га) - Павлодарская и Восточно-Казахстанская области (Кулундинская..., 1972). Согласно одному из вариантов физико-географического районирования СССР в пределах Алтайского края выделены Западно-Кулундинская и Восточно-Кулундинская подпровинции (рис. 1).

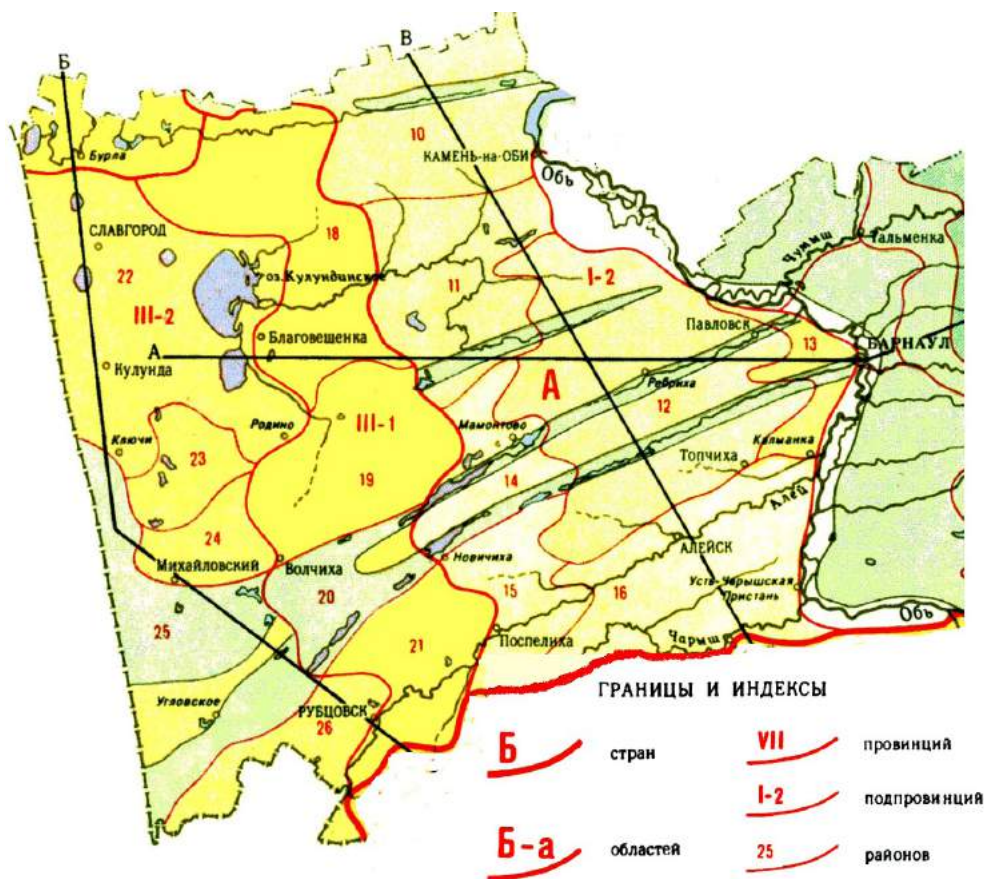


Рис.1. Фрагмент схемы физико-географического районирования: А – Западно-Сибирская страна; I-2 – Приобская левобережная подпровинция (10 – Верхнебурлинский, 11 – Ветрено-Телеутский, 12 – Касмалинский, 13 – Барнаульский, 14 – Горькоозерный, 15 – Среднеалейский, 16 – Нижнеалейский районы); III – 1 – Восточно-Кулундинская подпровинция (18 – Суетский, 19 – Кучукский, 20 – Горькопрешеечный, 21 – Алейско-Скляухинский районы); III-2 – Западно-Кулундинская подпровинция (22 – Кулундинско-Яровой, 23 – Каипский, 24 – Баскаимский, 25 – Шалдайско-Песчаноборский, 26 – Бельагашский районы) (Атлас..., 1978).

Достаточно полное описание климата исследуемой территории представлено в известной работе А.П. Сляднева, Я.И. Фельдмана «Важнейшие черты климата Алтайского края» (1958), однако в данной работе представлен ограниченный ряд метеонаблюдений (рис. 2).

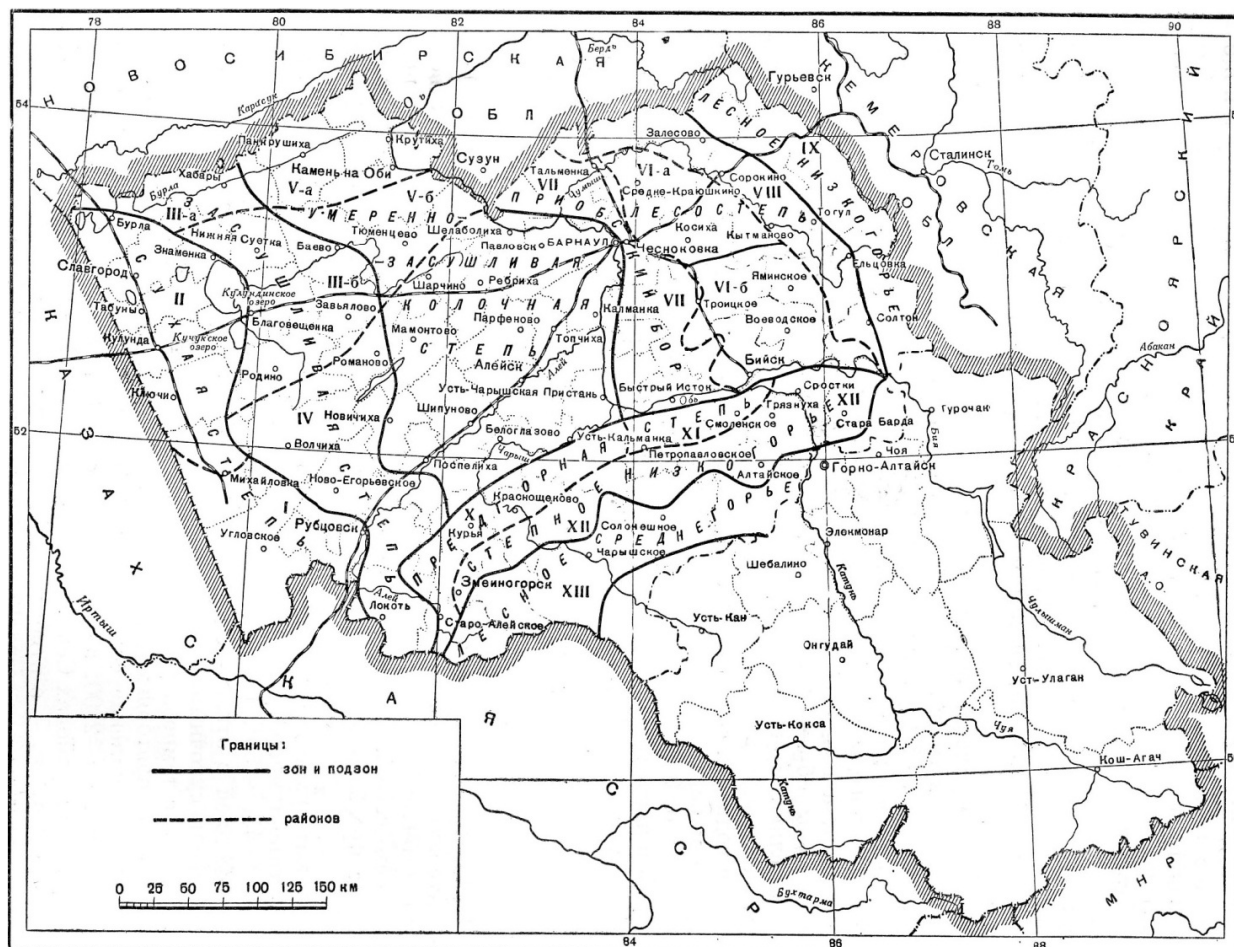


Рис. 2. Схема климатического районирования Алтайского края (Сляднев, Фельдман, 1958).

Для Кулундинской равнины, в целом, характерно большое количество света и тепла в вегетационном периоде - например, суммы активных температур - 2000-2600 °С и недостаточное увлажнение: 230-350 мм/год, из которых до 70% влаги приходится на теплый период (с апрель по октябрь). Распределение осадков, как по территории, так и по сезонам неравномерно: в первую половину вегетационного периода (май-июнь), влага для растений особенно необходима, однако выпадает только 50-70 мм. В засушливые годы (1962, 1963, 1965) общая сумма осадков снижалась до 120-150 мм, а их максимум смещался на август. Во влажные годы наблюдалось увеличение осадков во все сезоны, особенно в мае и июне (табл. 1).

Таблица. 1. Количество осадков по периодам года (сухая степь) (Сляднев, 1965)

Метеостанция	Начало вегета- ции (V-VI)		Формирование урожая (VII)		Теплый период (IV-X)		Холодный период XI-III		Год
	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	
Рубцовск	74	24	46	14	227	72	90	28	317
Славгород	57	22	49	19	202	73	74	27	276
Павлодар	54	25	44	23	170	78	49	22	219

Почвы исследуемой территории развивались на мезозойско-кайнозойском седimente в соответствующих климатических условиях. Для Западно-Кулундинской подпровинции характерны каштановые и темно-каштановые почвы, которые переходят в южные малогумусные маломощные и среднемощные черноземы Восточно-Кулундинской подпровинции (Атлас..., 1978). По классификации Мировой коррелятивной базы данных почвенных ресурсов (*WRB*) данные типы относятся к каштановым почвам (Zech et al., 2014). В непосредственной близости от соленых озер идет процесс засоления, что определяет появление почв галогенного ряда (солонцы, солончаки, солоди) которые, как правило, используются под пастбища.

Учитывая высокую теплообеспеченность и плодородие почв, Кулундинская равнина, составляя в советское время лишь 5% от территории Западной Сибири, была вовлечена в различные кампании по хозяйственному освоению. Так, в период 1954-1963 гг. была развернута кампания по «освоению целинных и залежных земель». Итогом сплошной распашки Кулундинской равнины стала деградация почв на больших площадях под влиянием ветровой и водной эрозии (Фрюауф, 2014). Кроме того, череда засух 1962, 1963 и 1965 годов наглядно продемонстрировали, что одним из основных лимитирующим факторов развития сельского хозяйства данной территории является дефицит влаги. В этой связи, в «эпоху мелиорации» - 1970-е годы Кулундинскую равнину включили в народно-хозяйственный план по увеличению орошаемых земель за счет поливного земледелия (Мосиенко, 1972). С переходом на рыночные отношения в 1990-е годы в России и Казахстане произошло резкое уменьшение государственного финансирования, и площадь поливных земель значительно сократилась. Кроме того, к этому времени водное орошение превратилось в фактор экологической опасности. В мировой экономике возникает вектор на применение природно-имитационных способов мелиорации земель и окружающей среды человека (Дмитриева, Напрасников, 2008).

В этом контексте идеология германо-российского проекта «Кулунда» - *Как предотвратить глобальный синдром «dust bowl» – «пыльных бурь»?»* (далее «Кулунда»), финансируемого Федеральным министерством образования и науки Германии (*BMBF*) в период 2011-2016 гг. является отражением подобной тенденции (Фрюауф, 2014). Особое место в проекте занимает тестирование технологий земледелия на фоне наблюдаемых изменений климата. Для проведения тестовых испытаний заложены опытные поля в трех крестьянско-фермерских хозяйствах Алтайского края в сухостепной зоне (Баскаимский физико-географический район), умеренно засушливой колочной степи (Горькоозерный физико-географический район) и лесостепи (Барнаульский физико-географический район) (см. рис. 1-2), в которых была развернута мониторинговая сеть по наблюдению за значимыми климатическими и почвенно-гидрологическими параметрами.

По состоянию на 2016 год мониторинговая сеть состоит из: 4 метеостанций (далее ГМС), 4 почвенно-гидрологических станций (далее ПГС), трех комплектов для экспресс-анализа влажности почв (фирма-производитель ООО «Эко-Тех», Германия, нем. «Есо-Тех»). В сеть входит лизиметрическая установка гравитационного действия (далее сокр. лизиметр). Лизиметр является совместной разработкой Центра экологических исследований им. Гельмгольца (г. Фалькенберг, Германия, нем. сокр. UFZ), в кооперации с фирмой изготовителем «Приборы для окружающей среды» (г. Мюнхенберг, Германия, нем. сокр. UGT). В статье будут представлены результаты по стационару в сухой степи на базе крестьянского хозяйства «Партнер», с. Полуямки, Михайловского района Алтайского края (далее стационар «Полуямки»).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Осенью 2012 года в с. Полуямки были установлены 1 ГМС и 2 ПГС. ПГС установлены под тестовыми участками, с различными технологиями обработки почв. Кроме того, в непосредственной близости заложены опыты по восстановлению пастбищ. ГМС оборудована пиранометром (на высоте 2 м) для измерения солнечной радиации, мультисенсором (на высоте 2 м), измеряющим направление и скорость ветра, температуру и влажность воздуха, атмосферное давление и количество осадков. Дополнительно твердые осадки измеряются плувиометром, который установлен в осадкомере Хелльманна (*Hellmann*) на стандартной высоте 1 метр. ПГС оборудована датчиками на глубинах 30 см, 60 см и 120 см, которые также в автоматическом режиме (каждый час) производят измерение содержания влаги, температуры почвы, осмотического давления и электропроводности.

В июне 2013 года был установлен лизиметр в непосредственной близости от ГМС. Лизиметр позволяет получать инструментальные данные для расчета водного и солевого баланса почв. Лизиметр состоит из двухсекционного пластмассового контейнера, который устанавливается в подготовленный профиль и двух емкостей, изготовленных из стали. Диаметр каждой емкости 1 м² и высота 2 м (рис. 3, 4).

Водный баланс:

$$\Delta W(t) = N(t) - ET(t) - S(t) - O(t)$$

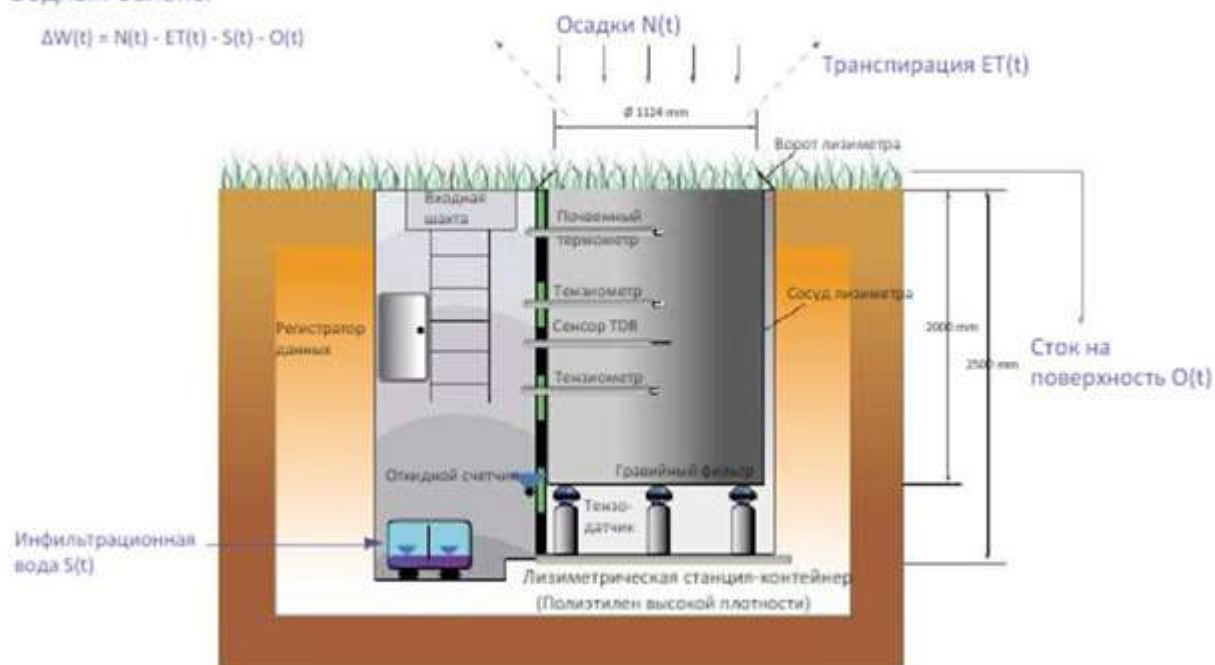


Рис. 3. Принципиальная схема лизиметрической станции и элементы водного баланса.



Рис. 4 Вид лизиметра на поверхности после установки. Стационар «Полуямки» (Фото А.А. Бондарович, 29.06.2013 года).

Емкости лизиметра были заполнены ненарушенными 2-х метровыми монолитами почв. Один монолит (далее монолит 1) отобран на пашне, которая интенсивно использовалась в течение последних 60 лет. В 2013 году была посеяна яровая пшеница, в 2014 году – горох, в 2015 – яровая пшеница (рис. 5).



Рис. 5. Монолит 1 в 2013 и 2015 году - яровая пшеница (Фото. А. А. Бондарович, 20.07.2013 год).

Второй монолит (далее монолит 2) был отобран в защитной лесополосе 30-летнего возраста на опушке с участком злаково-ковыльной сухой степи (рис. 6). Монолит 1(пашня) - чернозем южный среднесуглинистый легко - и среднесуглинистого гранулометрического состава. Монолит 2 (залежь) - вариант чернозема с

более высоким содержанием гумуса. По классификации (WBR) оба варианта – каштановые почвы (Zech et al., 2014).

На глубине в 30, 50, 120 см в осевую часть каждого монолита установлены датчики, измеряющие влажность, температуру и осмотическое давление в почве. Отобранные почвенные монолиты установлены на электронные весы, что позволяет с высокой точностью измерять приход и расход, поступающей на поверхность влаги. Многолетний опыт исследований в КНР показал, что точность весов в этом типе лизиметрических станции составляет ± 20 г (Xiao, H. et al., 2009). Кроме того, впервые на данном лизиметре установлена система, которая должна отделять снежную массу по диаметру монолитов. Метеоусловия в период снегонакопления за наблюдаемый промежуток времени приводили к образованию ледяных корок, что не позволило системе работать стабильно. По этой причине достоверность данных по массе монолитов в зимний период вызывает сомнение. В настоящий момент идет поиск новых технических решений. Подробная информация по особенностям установки и технических характеристик всех станций опубликована в совместной статье авторского коллектива (Stephan et al., 2014).



Рис. 6. Место отбора монолита 2 (фото А.А. Бондарович, 27.06.2013 года).

В Европе насчитывается 2450 лизиметрических станций, 1260 из них расположено в Германии. Лизиметрические станции, произведенные фирмой «Приборы для окружающей среды» (UGT, Германия), установлены в Германии, Швейцарии, Китае, Иране и Южной Корее (Пузанов и др., 2014). В Заксен - Ангхальдт, Германия, в засушливой области в предгорьях Гарца развернута мониторинговая сеть, состоящая из метеорологических, почвенно-гидрологических и гидрологических станций (фирма-производитель «Эко-Тех», Германия), где изучается воздействие на водный баланс климатических изменений и различных технологий обработки почв (Шмидт и др., 2014). Таким образом, наблюдения в рамках мониторинговой сети, развернутой в Алтайском крае, включены в международные программы агроклиматических, почвенно-гидрологических и экологических наблюдений.

В целях сопоставления получаемых данных в рамках развернутой мониторинговой сети, а также изучения глобальных и региональных изменений климата применялись методы обработки данных существующей сети метеостанций Росгидромета, принятых Всемирной Метеорологической организацией (WMO) и Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC). Интерес представляют также материалы ряда монографий, посвященных изучению теплового и водного баланса, которые были собраны в 1953-1971 годы - период интенсивного освоения Кулундинской равнины (Мосиенко, 1972, Кулундинская..., 1972).

На основе расчетных методов В.С. Мезенцева (1957), А.Р. Константинова (1968), Л. В. Ворониной, Р. А. Пазухиной, А. П. Сляднева (1972) в данных работах опубликованы основные составляющие теплового и водного баланса Кулундинской равнины, что позволяет сравнить данные, получаемые ГМС и гравитационным лизиметром нового поколения в режиме реального времени.

В целом, все методы определения суммарного испарения (эвапотранспирации), как основного и наиболее сложно измеряемого параметра водного баланса, основаны на применении результатов:

а) полевых измерений; б) расчетов; в) эмпирических моделей (А.А. Черемисинов, А.Ю. Черемисинов, 2016). Большинство методов применялись для конкретных региональных условий. В этой связи, в целях адаптации метода к иному региону необходимо уточнять либо вводить специальные поправочные коэффициенты, учитывающие особенности рельефа и с\х культур.

Эталонным методом в России является расчётный метод на совместном решении уравнений водного и теплового балансов по данным региональных ГМС. Например, этот метод применялся в известной монографии «Кулундинская степь и вопросы мелиорации» (1972). В частности, была использована методика расчета теплового баланса (связь между температурой и влажностью воздуха на высоте 2 м) (Тепловой..., 1966) и методики расчета водного баланса (Константинов, 1968) как разницы испарения с поверхности почвы и максимально возможного испарения (*испаряемости*).

Вместе с тем, в последнее время предпочтение отдается полевым (количественным) методам, к которым относится и лизиметрический метод (Методы..., 1976). Метод не получил широкого распространения на практике, поскольку продолжительное время технические решения делали эти измерения достаточно трудоемкими. Лизиметрические станции нового поколения позволяют проводить сложные комплексные измерения в режиме реального времени, но финансово очень затратные.

Учитывая технические характеристики лизиметра и измерения коллективом разработана методика расчета водного баланса в сухой степи. Основными элементами прихода (W), при отсутствии орошения, являются: а) осадки (N), б) приток в почву от грунтовых вод (невозможен по конструктивным особенностям лизиметра), в) приток поверхностных вод (также невозможен), г) конденсация водяного пара в почве из воздуха атмосферы (на данном типе лизиметра, возможно, получить расчетным способом). В свою очередь расход воды (W) включает: а) испарение растениями (транспирация) и с поверхности почвы (эвапорация), которые учитываются как суммарное испарение (эвапотранспирация) (Et), б) поверхностный сток (O), в) инфильтрация (S) (см. рис.3).

Эти элементы составляют водный баланс, который можно представить в виде уравнения:

$$W = N(t) - Et(t) - S(t) - O(t) \quad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Репрезентативность, получаемых данных ГМС на стационаре «Полуямки», подтверждается значимой корреляцией с данными сети Росгидромета на территории Алтайского края. Коэффициенты детерминации среднемесячных температур за вегетационный период 2013-2015 годов между ГМС Полуямки-Рубцовск: $R^2=0,965$ (Рубцовск, направление SO, расстояние 220 км, сухая степь), Полуямки – Ребриха: $R^2=0,948$ (Ребриха, NNO, 220 км-умеренно-засушливая колючая степь) и Полуямки-Барнаул: $R^2=0,947$ (Барнаул, NO, 350 км, лесостепь). По осадкам наблюдается более слабая зависимость. В свою очередь, синхронность хода параметров между всеми станциями стационара «Полуямки» детально рассмотрена в совместной авторской статье коллектива (Stephan et al., 2014).

На основе данных ГМС (осадки, мм - суммарный осадкомер Хельммана на высоте 1 м) и лизиметрической станции (массы монолитов) за 2013-2015 годы, проведены расчеты по месяцам, водного баланса (W) и эвапотранспирации (Et). В ходе исследований установлено, что количество осадков, зафиксированных метеостанцией на высоте 1 метр, как правило, несколько меньше, чем измеряет лизиметрическая станция - каждый метр высоты дает разницу в 10% (Xiao, H. et al., 2009, Stephan et al., 2014).

По различным объективным техническим причинам существует проблема непрерывности измерений и присутствуют пробелы в данных. Как отмечено выше, в зимние месяцы система позволяющая отделять снежную массу на монолитах от близлежащего слоя работала нерегулярно, поэтому измеренная масса монолитов в период залегания снежного покрова не всегда была корректной. Учитывая вышесказанное, в качестве наиболее достоверного ряда можно рассматривать данные за вегетационный период 2015 года.

На основе хода среднесуточных температур воздуха по МТС Полуямки за 2013-2015 гг. выявлены даты устойчивого перехода среднесуточных температур воздуха через 0° , 5° , 10°C (табл. 2) и начало/конец вегетационного периода.

Таблица. 2. Даты перехода устойчивых среднесуточных температур воздуха через 0°, 5°, 10 °С в 2013-2015 гг. по данным ГМС «Полуямки» (*Примечание - данные только с 1.05.13)

Год	дата перехода устойчивых среднесуточных температур воздуха			
	через 0°С/обратный переход через 0°С	через 5°С/ обратный переход через 5°С (вегетационный период)	через 10°С/ обратный переход через 10°С	Длительность вегетационного периода, суток
2013	Нет данных/ 8 ноября	1 мая* / 3 октября	21 мая/27 сентября	156*
2014	18 марта/8 ноября	29 марта/16 октября	18 апреля/18 сентября	202
2015	10 апреля/ 1 ноября	11 апреля/12 октября	18 апреля/5 октября	184

Анализ хода среднесуточных температур воздуха за 2015 показал, что устойчивый переход среднесуточных температур воздуха через 0 °С произошел только 10.04.15 (в предыдущем году - 18.03.2014, сдвиг 24 дня). Но при этом, возврат отрицательных среднесуточных температур как в 2014 году уже не наблюдался. Устойчивый переход среднесуточных температур воздуха через 5°С произошел уже 11.04.2015. Таким образом, эту дату, следует принять за начало вегетационного периода. При этом температура воздуха увеличивалась на 16 градусов за 12 дней в период: 10.04.15 (3.6 °С) - 22.04.15 (19.6 °С). В почве монолита под пашней и степной растительностью переход через 0 °С произошел 12.04.15 и 13.04.15 соответственно (в 2014 году под пашней - 27.03.14, а под степной растительностью 30.03.14.). Значительный рост температуры воздуха, снеготаяние, задержка в прогревании почв привела к тому что, 11.04.15 -12.04.15 возник «запирающий слой», что привело к подтоплению степной западины в районе с. Назаровка и пос. Ащегуль (рис. 7).

В целом, несмотря, на довольно экстремальные переходы температур на фоне 2013 и 2014 годов, 2015 год с точки зрения соотношения температур и режима осадков, был наиболее благоприятным для растениеводства.

Полученные данные по ГМС и лизиметру показывают, что водный баланс за вегетационный период 2015 все же был отрицательный (табл. 3). Предсказуема и понятна разница в эвапотранспи-



Рис. 7. Затопление пастбищных угодий и размыв автомобильной дороги в районе с. Назаровка. Дата: 11.04.2015, 17:00 часов, температура воздуха - 14°С (фото В.В. Щербинин).

рации между монолитами 1 и 2. Плотнo-сомкнутая степная растительность увеличивает потери влаги за счет транспирации. Разница по эвапотранспирации за вегетацию 2015 года между монолитами составила 56 мм. Величина довольно значительная, учитывая, что такое количество осадков выпало в июне и в августе (табл. 3. и рис. 8).

Таблица 3. Среднемесячные температуры, осадки, разница масс монолитов (водный баланс) и эвапотранспирация по данным ГМС и лизиметра. Вегетационный период 2015, стационар «Полуямки» (сухая степь). (Примечание существует пробел в данных лизиметра с 1.05 - 6.05.15).

Полуямки, 2015 год	Средняя t воздуха °C	Σ осадки (N), мм	W(пашня) мм/мес.	Eta(пашня) мм/мес	W(залежь) мм/мес	Eta(залежь) мм/мес.
Май	15,7	22,38	-33,26	55,58	-77,38	99,70
Июнь	20,9	58,96	-96,06	155,02	-80,21	139,17
Июль	21,4	89,81	-5,74	95,55	-31,45	121,26
Август	19,20	55,36	-16,15	71,50	- 22,37	77,73
Сентябрь	11,6	17,95	-1,68	19,63	-0,64	18,59
Среднее t воз-ха °C \ Σ, мм	17,7	244,46	-152,89	397,28	-212,05	456,45

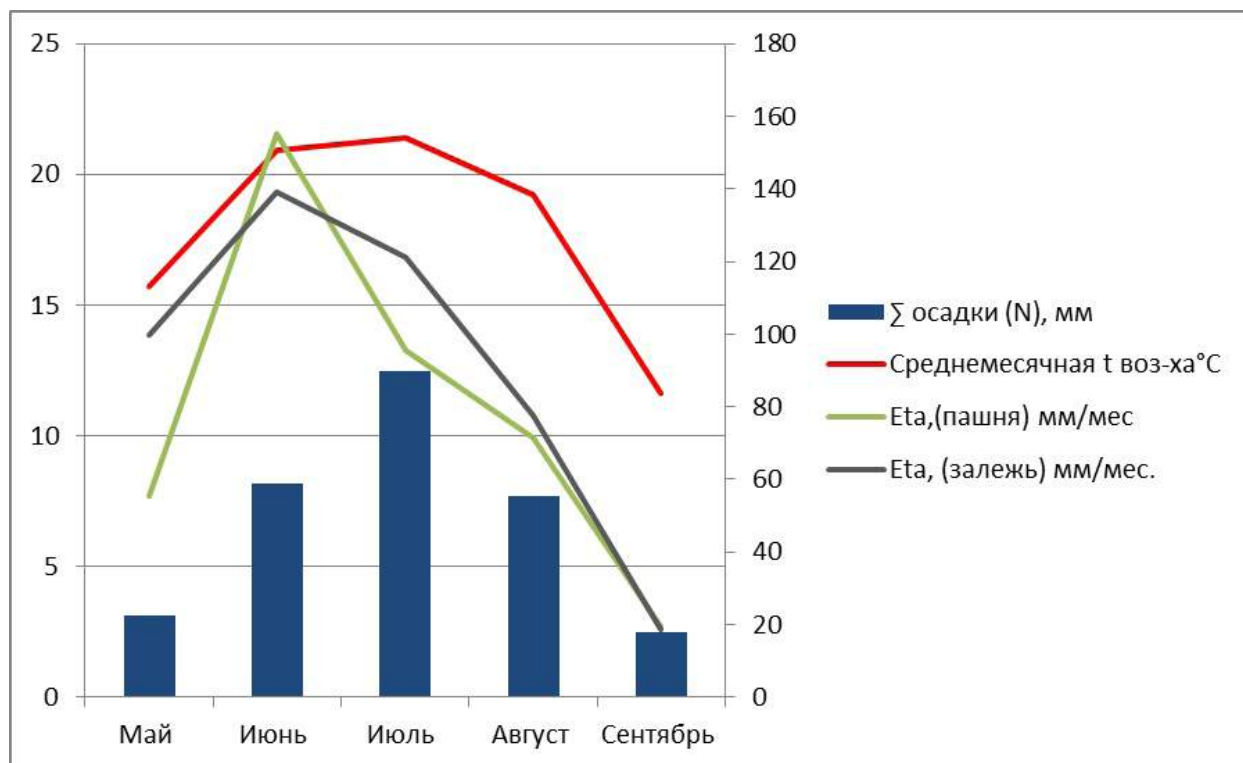


Рис. 8. Распределение среднемесячных температур, осадков и эвапотранспирация по данным ГМС и лизиметра. Вегетационный период 2015, стационар «Полуямки» (сухая степь). Здесь и далее существует пробел в данных лизиметра за 1.05 - 6.05.15.

В районах Кулунды в июне, как правило, выпадает небольшое количество осадков, с которыми выявлена значимая связь урожайности яровой пшеницы, кроме того, в июне традиционны суховеи и высокий уровень солнечной радиации (Кулундинская..., 1972). Подобное отмечалось в июне 2015 года, когда в обоих вариантах эвапотранспирация была максимальной. Сводная таблица по среднемесячным суммам солнечной радиации, температуре почвы на глубине 30 см и среднемесячной скорости ветра в очередной раз подтверждают данные о важной роли солнечной радиации и скоро-

сти ветра в процессе испарения (см. таб. 4). Кроме того, зависимость между солнечной радиацией и приземной температурой воздуха не всегда линейна. Так, снижение среднемесячной скорости ветра в июле лишь на 0,4 м/с, при одновременном уменьшении солнечной радиации на 53 Вт/м², но возрастающей среднемесячной температуре воздуха на 0,5 °С и почвы на глубине 30 см на 2,1°С привело к уменьшению эвапотранспирации на монолите 1 (пашня) на 60 мм. Под монолитом 2 (залежь) в сходных радиационных, температурных и ветровых условиях при увеличении среднемесячной температуры почвы на 1,9 °С эвапотранспирация уменьшилась лишь на 18 мм. Последнее демонстрирует, и то, что растительность оказывает затеняющий эффект и одновременно, в противовес транспирации уменьшает суммарное испарение. Возможно, с этим, отчасти связана, сравнительно высокая эвапотранспирация в июне именно на пашне (155 мм). Монолит 1 был засеян яровой пшеницей, но грачи (*Corvus frugilegus*) уничтожили сначала часть «посева», а затем и «урожая». Таким образом, на монолите 1 произошло уменьшение альбедо, что в сочетании с радиацией и ветром создало подобный иссушающий эффект.

Таблица 4. Среднемесячные температуры воздуха и почвы на глубине 30 см, а также среднемесячной скорости ветра и эвапотранспирация по данным ГМС и лизиметра. Вегетационный период 2015, стационар «Полуямки» (сухая степь). (Примечание существует пробел в данных лизиметра с 1.05 - 6.05.15).

Полуямки, 2015 год	Среднемесячная солнечная радиация Вт/м ²	Средняя скорость ветра м/с	Средняя t почвы на 30 см °С (пашня)	Eta,(пашня) мм/месяц	Средняя t почвы на 30 см °С (залежь)	Eta, (залежь) мм/месяц
Май	279,6	3,1	15,2	55,58	13,4	99,70
Июнь	299,3	3,2	19,5	155,02	18	139,17
Июль	246,1	2,8	22,1	95,55	19,9	121,26
Август	216,1	2,5	20	71,50	18,2	77,73
Сентябрь	133,4	2,6	14,6	19,63	13,1	18,59
Среднее	234,9	2,8	18,3	397,28	16,5	456,45

На следующем графике прослеживается зависимость испарения от солнечной радиации (рис 9).

Интерес вызывает и суточное распределение влажности в почве под монолитами на глубине 30 и 50 см (табл. 5, рис. 10). В мае максимальные значения влажность достигает на 30 см под пашней и на 50 см под залежью, а минимальные влажность на 30см под степью и 50 см под пашней («зеркальный эффект»). В результате интенсивных процессов испарения в июне на уровне 30 см (пашня) и 50 см (залежь) влажность сокращается на 8 и 7 % соответственно, а на 30 см (залежь) и 50 см (пашня) на 3,2 и 2,8 %. В июле соотношение практически не изменяется и влажность в обоих «вариантах» сохраняется на уровне июня вплоть до сентября. При этом ровный ход влажности протекает на фоне резкого сокращения эвапотранспирации на пашне и значительных осадках в июле - 90 мм. Таким образом, июльские осадки полностью компенсировали дефицит июньской влаги. Сделать вывод, насколько это своевременно, возможно только относительно конкретных с/х культур.

Представляет интерес сравнение измеренных параметров на стационаре «Полуямки» в 2015 году, с измеренными и расчетными данными по эвапотранспирации, полученными в 60-70-х гг. в Кулундинской равнине. Полагаем, что это сравнение корректно, несмотря на то, что с 1966 по 2011 наметился значительный положительный линейный тренд годовой температуры и заметный отрицательный тренд годовых осадков в степной зоне Алтайского края. Однако при расчете ГТК Селянинова за 1982-2013 гг. выяснилось, что наиболее значительное сокращение увлажненности территории за рассматриваемый период отмечалось для предгорных и низкогорных участков степей (-0,079/10 лет), а также лесостепей (-0,066/10 лет) Алтайского края, при минимальных темпах – в сухостепных районах (-0,019/10 лет) (Харламова и др., 2014). Таким образом, в сухой степи наблюдались минимальные изменения.

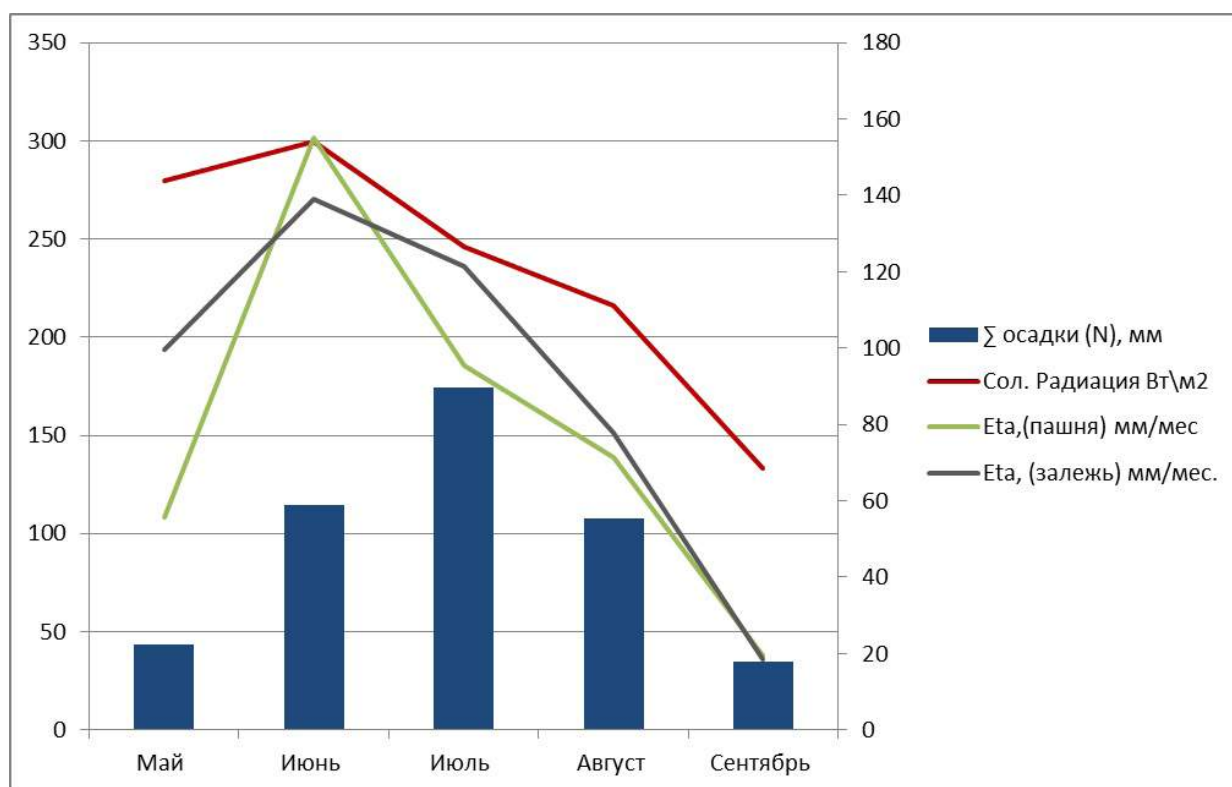


Рис. 9. Среднемесячная величина солнечной радиации, сумма осадков и эвапотранспирация по данным ГМС и лизиметра. Вегетационный период 2015, стационар «Полуямки» (сухая степь).

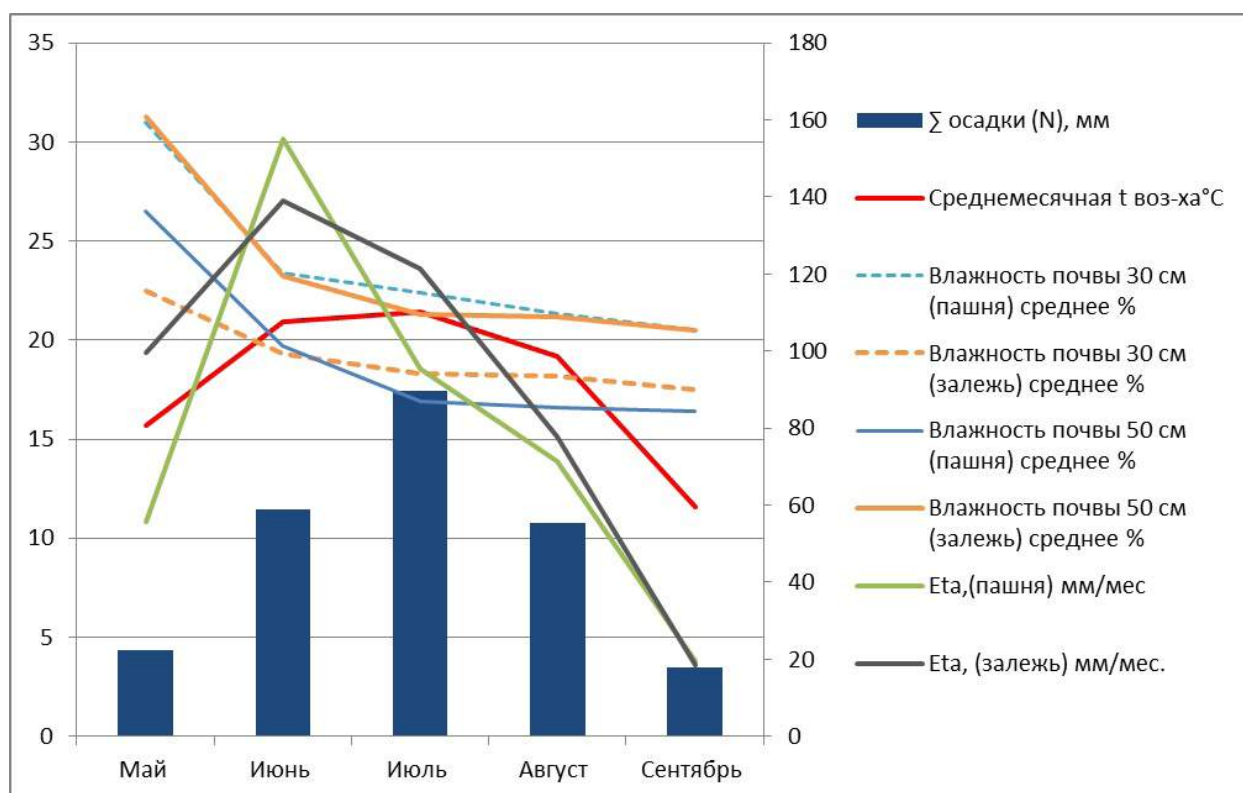


Рис. 10. Ход среднемесячных температур воздуха, осадков, влажности почв на глубине 30 и 50 см и эвапотранспирация по данным ГМС и лизиметра. Данные по месяцам за вегетационный период 2015 гг. с. Полуямки (сухая степь).

Таблица 5. Среднемесячные температуры, осадки, влажность почвы на глубине 30 см и 50 см монолитов по данным ГМС и лизиметра. Вегетационный период 2015, стационар «Полуямки» (сухая степь).

Полуямки 2015 год	Средняя t воздуха °C	Σ осадки (N), мм	Влажность почвы 30 см (пашня) среднее %	Влажность почвы 30 см (залежь) среднее %	Влажность почвы 50 см (пашня) среднее %	Влажность почвы 50 см (за- лежь) среднее %
Май	15,7	22,38	31	22,5	26,5	31,3
Июнь	20,9	58,96	23,4	19,3	19,7	23,2
Июль	21,4	89,81	22,4	18,3	16,9	21,3
Август	19,20	55,36	21,3	18,2	16,6	21,2
Сентябрь	11,6	17,95	20,5	17,5	16,4	20,5
Среднее	17,7	244,46	23,7	19,6	19,2	23,5

Например, максимальная расчетная испаряемость по метеоданным ближайшей ГМС к стационару «Полуямки» (Михайловский Содокмбинат) за период вегетации представлена в табл. 6. и на рис. 11 (Кулундинская..., 1972).

Таблица 6. Испаряемость и испарение за вегетационный период по метеопункту Михайловский Содокмбинат (по Кулундинская..., 1972) и эвапотранспирация по стационару «Полуямки» за 2015 год.

Пункт	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Итого
М. Содокмбинат, испаряемость, мм	111	144	127	81	81	544
М. Содокмбинат, испарение, мм	71,3	75	77,5	74,4	74,4	372,6
Полуямки, $E_{та}$ (пашня), мм	55,58	155,02	95,55	71,50	19,63	397,28
Полуямки, $E_{та}$ (залежь), мм	99,70	139,17	121,26	77,73	18,59	456,45

В монографии Н.А. Мосиенко (1972) также опубликованы расчетные данные по методу В.С. Мезенцева (1957) по пункту Михайловский Содкомбинат за май-август (при влагообеспеченности в год 50%) - максимально возможное испарение: 513 мм; фактическое суммарное испарение: 183 мм, дефицит увлажнения почвы: -223 мм (табл. 7). В целом, следует отметить значимую корреляцию расчетных результатов с измеренными.

Таблица 7. Максимально возможное и фактическое суммарное испарение за май-август по метеопункту Михайловский Содокмбинат (по Н.А. Мосиенко, 1972), эвапотранспирация и водный баланс почвы по данным стационара «Полуямки» за 2015 год.

Пункт	Максимально возможное испарение Z , мм	Фактическое суммарное испарение Z_{ϕ} , $E_{та}$, мм	Дефицит увлажнения почвы, W , мм
М.- Содокмбинат	513	183	-223
Полуямки(пашня), 2015		377,65	-151,21
Полуямки(залежь), 2015		437,86	-211,41

ВЫВОДЫ

В ходе исследований впервые получены измерения, позволяющие определить с высокой точностью составляющие водного баланса почв, а в перспективе разработать модель динамики влажности почв в сухостепной, степной и лесостепной зонах внутриконтинентальных территорий Евразии.

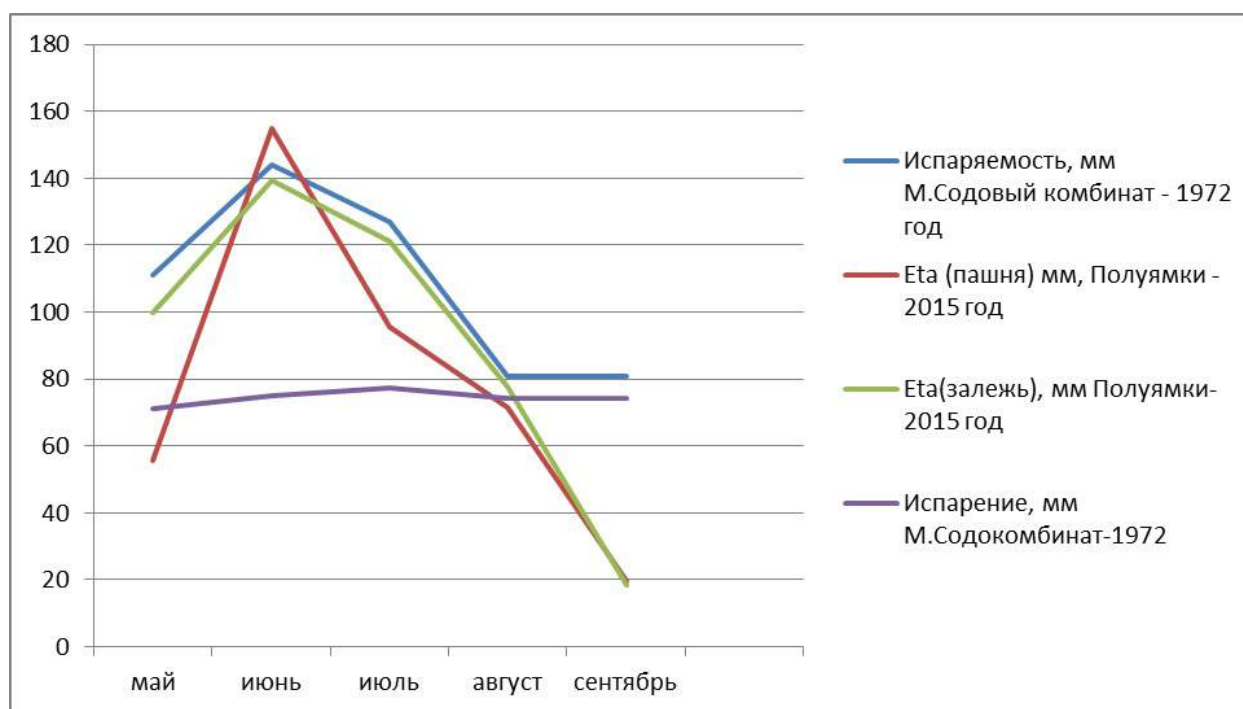


Рис. 11. Динамика испаряемости и испарения за вегетационный период многолетние данные по пункту Михайловский Содовый комбинат (по Кулундинская..., 1972) и эвапотранспирации по стационару «Полуямки» за 2015 год.

Данные лизиметра о динамике влажности почвы и эвапотранспирации (Eta) в реальном времени могут быть использованы для уточнения существующих моделей климатических сценариев в Северном полушарии Евразии.

Результаты исследований позволяют уточнить схемы агроклиматического районирования, и как следствие, выбирать и адаптировать оптимальные технологии земледелия в сухостепной, степной и лесостепной зонах внутриконтинентальных территорий Евразии в условиях региональных и глобальных изменений климата.

Созданная мониторинговая сеть позволяет получать количественные данные о ходе процессов в пределах не только антропогенных, но и естественных степных и лесостепных ландшафтов, провести эколого-экономического обоснования при определении оптимального соотношения пашен, пастбищ и особо охраняемых территорий в целях поддержания устойчивого равновесия экосистем степной и лесостепной зон Евразии при их непрерывном использовании в хозяйственной деятельности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Алтайского края. 1978. – Т.1. – М.-Барнаул.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. – 222 с.
- Воронина Л. В., Пазухина Р. А., Сляднев А. П. К вопросу о тепловом балансе юго-востока Западно-Сибирской равнины / Л. В. Воронина, Р. А. Пазухина, А. П. Сляднев // География Западной Сибири. – Новосибирск, 1972. – Вып. 60. – С. 34–72
- Дмитриева В.Т., Напрасников А.Т Вектор мелиоративного природопользования: От древнего до современного мира // Вестник МГПУ. Серия «Естественные науки». – 2008. – 2 (24) – С. 24
- Константинов А. Р. Испарение в природе / А. Р. Константинов. - Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 532 с.
- Кулундинская степь и вопросы ее мелиорации /под ред. П.Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, 1972. – 508 с.
- Методы расчета водного баланса // Международное руководство по исследованиям и практике. – Ленинград, Изд-во: Гидрометеиздат, 1976. – 120 с.
- Мосиенко Н.А. Агрогидрологические основы орошения в степной зоне (на примере Западной Сибири и Северного Казахстана). – Ленинград, Изд-во: Гидрометеиздат, 1972. – 214 с.

- Мезенцев В.С. Метод гидролого-климатических расчетов и опыт его применения для районирования Западно-Сибирской равнины по признакам увлажнения и теплообеспеченности / В.С. Мезенцев // Тр.ОмСХИ. – Омск: Изд-во ОмСХИ, 1957. – Т.27. – 121 с.
- Пузанов А.В., Балыкин Д.Н., Майсснер Р., Стефан Э. Оценка водно-солевого режима антропогенно – преобразованных почв степных территорий с использованием гравитационных взвешиваемых лизиметров // Экологические и экономические стратегии устойчивого землепользования в степях Евразии в условиях глобального изменения климата: Материалы Международной научно-практической конференции, 30 сентября-3 октября 2014 г., Барнаул. - Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2014. – С.121–124
- Сляднев А.П., Фельдман Я.И., Важнейшие черты климата Алтайского края (без Горно-Алтайской АО) // Природное районирование Алтайского края. Т. 1.: Труды комплексной экспедиции. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – С. 9-61.
- Сляднев А.П. Географические основы климатического районирования и опыт их применения на юго-востоке Западно - Сибирской равнины // География Западной Сибири. - Новосибирск, 1965. - С. 3–122
- Тепловой и водный режим Украины / Л. И. Сакали, Н.И. Гойса, Р.Н. Олейник/ Под ред. А.Р. Константинова. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1966. – 592 с.
- Фрюауф М. Опыт и последствия североамериканского синдрома “dust bowl — пыльных бурь” для проекта «Кулунда» // Вестник Алтайской науки. 2014. – № 4. – С. 226-233.
- Харламова Н.Ф., Бондарович А.А., Козлова Д.С., Плехова А.В. Изменчивость увлажненности территории лесостепной и степной зон Алтайского края в течение 1982-2013гг. // География и природопользование Сибири: сборник научных статей. Барнаул. – 2014. – Вып.18. – С. 206–215.
- Шмидт Г., Бергманн А., Иллигер П., Фрюауф М., Штефан Э., Цирдт М., Бондарович А.А. Эффекты воздействия климатических изменений и землепользования на водный баланс засушливых областей центральной Германии (на примере водосборного бассейна Зальца) // Вестник Алтайской науки. – 2014. – №4. – С. 204–210.
- Черемисинов А.А., Черемисинов А.Ю., Обзор расчетных методов определения суммарного испарения орошаемых сельскохозяйственных полей // Научный журнал российского НИИ проблем мелиорации. 2016. – № 1(21). – С. 113–133.
- Stephan E., Meissner R., Rupp H., Fruhauf M., Schmidt G., Illiger P., Bondarovitsch A., Balykin D., Scherbinin V., Puzanov A. Aufbau eines bodenhydrologischen Messnetzes in der sibirischen Kulundasteppe // Wasserwirtschaft. – 2014. – 10. – P. 15–22.
- Xiao H., Meissner R., Seeger J., Rupp H., Borg H. Testing the precision of a weighable gravitation lysimeter // Journal of Plant Nutrition Soil Science. – 2009. – 172. – P. 194–200.
- Xiao H., Meissner R., Seeger J., Rupp H., Borg H. Effect of vegetation type and growth stage on dewfall, determined with high precision weighing lysimeters at a site in northern Germany // Journal of Hydrology. – 2009. – 399. – P. 43–49.
- Zech W., Schad P., Hintermaier-Erhard G. Boden der Welt. Ein Bildatlas. 2 Auflage. Springer. Berlin. – 2014. – 164 s.

REFERENCES

- Atlas Altajskogo kraja.* (1978). Moscow–Barnaul. (in Russian).
- Cheremisinov, A.A., Cheremisinov, A.Y. (2016). Review of calculating methods for evapotranspiration of irrigated fields (review). *Scientific Journal of Russian Research Institute of Land Improvement Problems*, 1(21), 113–133. (in Russian).
- Dmitrieva, V.T., Naprasnikov, A.T (2008). Vektor meliorativnogo prirodnopol'zovaniya: Ot drevnego do sovremennogo mira. *Vestnik MGPU. Seriya Estestvennye nauki*, 2(24), 24. (in Russian).
- Fruhauf, M. (2014). Opyt i posledstviya severoamerikanskogo sindroma “dust bowl — pyl’nyh bur” dlja proekta «Kulunda». *Vestnik Altajskoj nauki*, 4, 226-233. (in Russian).
- Harlamova, N.F., Bondarovich, A.A., Kozlova, D.S., Plehova, A.V. Izmenchivost’ uvlazhnennosti territorii lesostepnoj i stepnoj zon Altajskogo kraja v techenie 1982-2013. *Geografija i prirodnopol'zovanie Sibiri: sbornik nauchnyh statej. Barnaul*, 18, 206–215. (in Russian).
- Konstantinov, A.R. (1968). *Isparenie v prirode*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian).
- Kulundinskaja step’ i voprosy ee melioracii.* (1972). P.J. Polubarinov-Kochin (Ed.). Moscow: Nauka. (in Russian).
- Metody rascheta vodnogo balansa. Mezhdunarodnoe rukovodstvo po issledovanijam i praktike.* (1976). Leningrad: Hydrometeoizdat. (in Russian).
- Mezenцев, V.S. (1957). Metod gidrologo-klimaticheskikh raschetov i opyt ego primenenija dlja rajonirovanija Zapadno-Sibirskoj ravniny po priznakam uvlazhneniya i teploobespechennosti. *Proceedings of Omsk Agriculture Institute*, 27, 121. (in Russian).

- Mosienko, N.A. (1972). *Agrohidrologicheskie osnovy oroshenija v stepnoj zone (na primere Zapadnoj Sibiri i Severnogo Kazahstana)*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian).
- Puzanov, A.V., Balykin, D.N., Meissner, R., Stephan, E. (2014). *Ocenka vodno-solevogo rezhima antropogenno – preobrazovannyh pochv stepnyh territorij s ispol'zovaniem gravitacionnyh vzveshivaemyh lizimetrov*. Proceed. Int. Conf. Jekologicheskie i jekonomicheskie strategii ustojchivogo zemlepol'zovanija v stepjah Evrazii v uslovijah global'nogo izmenenija klimata. Barnaul: Altai University. (in Russian).
- Sakali, L.I., Gojsa, N.I., Olejnik, R.N. (1966). *Teplovoj i vodnyj rezhim Ukrainy*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian).
- Schmidt, G., Bergmann, A., Illiger, P., Fruhauf, M., Stephan, E., Cirdt, M., Bondarovich, A. (2014). Jeffekty vozdejstvija klimaticeskij izmenenij i zemlepol'zovanija na vodnyj balans zasushlivyh oblastej central'noj germanii (na primere vodosbornogo bassejna Zal'ca). *Vestnik Altajskoj nauki*, 4, 204–210. (in Russian).
- Sljadnev, A.P. (1965). Geograficheskie osnovy klimaticeskogo rajonirovanija i opyt ih primenenija na jugo-vostoke Zapadno-Sibirskoj ravniny. *Geografija Zapadnoj Sibiri*, 53, 3–122. (in Russian).
- Sljadnev, A.P., Fel'dman, Ja.I. (1958). *Vazhnejshie cherty klimata Altajskogo kraja (bez Gorno-Altajskoj AO)*. In: Prirodnoe rajonirovanie Altajskogo kraja. Trudy kompleksnoj jekspedicii. Moscow: USSR Academy of Sciences. (in Russian).
- Stephan, E., Meissner, R., Rupp, H., Fruhauf, M., Schmidt, G., Illiger, P., Bondarovitsch, A., Balykin, D., Scherbinin, V., Puzanov, A. (2014). Aufbau eines bodenhydrologischen Messnetzes in der sibirischen Kulundasteppes. *Wasserwirtschaft*, 10, 15–22.
- Voronina, L.V., Pazuhina, R.A., Sljadnev, A.P. (1972). K voprosu o teplovom balanse jugo-vostoka Zapadno-Sibirskoj ravniny. *Geografija Zapadnoj Sibiri*, 60, 34–72. (in Russian).
- Xiao, H., Meissner, R., Seeger, J., Rupp, H., Borg, H. (2009). Effect of vegetation type and growth stage on dewfall, determined with high precision weighing lysimeters at a site in northern Germany. *Journal of Hydrology*, 399, 43–49.
- Xiao, H., Meissner, R., Seeger, J., Rupp, H., Borg, H. (2009). Testing the precision of a weighable gravitation lysimeter. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, 172, 194–200.
- Zech, W., Schad, P., Hintermaier-Erhard, G. (2014). *Boden der Welt. Ein Bildatlas. 2 Auflage*. Berlin: Springer.