

Д. К. Абиева¹, Р. К. Карагулова², К. А. Аюпов³, А. К. Толепбаева⁴, Г. М. Уразбаева⁵

¹К.г.н., управляющий директор центра геоинформационных технологий
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан)

²К.г.н., руководитель лаборатории географических информационных систем
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан)

³Начальник Центра мониторинга засушливых условий Департамента дистанционного зондирования Земли
(АО «Национальный центр космических исследований и технологий», Алматы, Казахстан)

⁴Научный сотрудник лаборатории географических информационных систем
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан)

⁵Старший научный сотрудник лаборатории географических информационных систем
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан)

АНАЛИЗ ПРИГОДНОСТИ НАБОРОВ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД (GLOBAL SURFACE WATER) ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ПЛОЩАДЕЙ ОЗЕР КАЗАХСТАНА

Аннотация. Рассмотрены возможности использования общедоступных наборов данных глобальных исследований поверхностных вод (Global Surface Water, GSW) для изучения межгодовой и внутригодовой динамики площадей озер Казахстана. Описана методика обработки наборов данных GWS для извлечения по маскам озер Казахстана площадью более 1 км² ежемесячных данных о водной поверхности, годовых данных о постоянных и сезонных водах. Анализ результатов на основе определения доли озер с пороговым значением ячеек со значением NoData позволил оценить пригодность наборов данных GWS «Monthly History» и «Yearly Water Classification» для изучения динамики озер Казахстана площадью более 1 км².

Ключевые слова: наборы данных глобальных исследований поверхностных вод, Global Surface Water (GSW), дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), озера Казахстана, межгодовая и внутригодовая динамика площадей озер.

Введение. Регулярно собираемые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются важными источниками для понимания, моделирования и прогнозирования природных процессов, а также текущего и будущего состояния и динамики системы «человек – Земля» [1]. Большие массивы данных (Big Data) дистанционного зондирования Земли не могут быть обработаны без инструментов, использующих высокопроизводительную вычислительную инфраструктуру [2]. Google Earth Engine (GEE) представляет собой облачную платформу, которая может обрабатывать большие наборы геопространственных данных внутренне-параллельным способом с высокой производительностью. После разработки алгоритма в GEE пользователи могут легко распространять свои результаты, создавать систематически продукты данных, создавать и развертывать интерактивные приложения, поддерживаемые ресурсами GEE [3].

За последние 5 лет в результате обработки огромного массива данных ДЗЗ спутника Landsat с использованием платформы GEE были получены различные продукты спутникового дистанционного зондирования, которые позволяют осуществлять глобальный мониторинг поверхностных вод на ранее невозможном уровне [4]. Одними из наиболее известных и востребованных являются наборы данных глобальных исследований поверхностных вод (Global Surface water) объединенного исследовательского центра Европейской комиссии. Создание набора данных GSW оказало влияние на исследование динамики как крупных озер, так и небольших и малых водоемов [5–8 и др.].

Озера Казахстана вносят вклад не только в развитие сельского и рыбного хозяйства, но и играют важную роль в сохранении экосистем, в том числе биоразнообразия. Большие колебания площади поверхности озера в течение короткого времени значительно влияют на водные циклы и местную экологическую среду [9]. Для защиты, развития и использования ресурсов озер важное значение имеют исследования динамических изменений озер и движущих сил этих изменений. Изучение

динамики площадей озер может дать важную информацию об изменении климата и региональных изменениях окружающей среды, влиянии экономической деятельности человека [10–13].

Наземным мониторингом площади (уровня) охвачена очень малая часть озер Казахстана (31 мониторинговое озеро). Результаты космического мониторинга водных объектов по продуктам казахстанских спутников KazEOSat-1 и KazEOSat-2 не являются репрезентативными из-за короткого периода наблюдений. В связи с этим получение данных для исследований пространственно-временной динамики озер Казахстана остается актуальным.

Данные и методы исследований. Краткая характеристика наборов данных GSW и методика их создания изложены на основе опубликованной статьи создателей наборов GSW [14].

Для глобальных исследований поверхностных вод использованы архивы космических снимков спутников Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI начиная с 16 марта 1984 года. В рамках глобальных исследований поверхностных вод разработана экспертная система для присвоения каждому пикселю данных Landsat одного из трех целевых классов: воды, земли или недействительных наблюдений – NoData (снег, лед, облака или проблемы, связанные с датчиком). Открытая вода – это любой участок воды размером более 30×30 м (без облачных ДДЗ), включая свежие разливы и морскую воду.

Механизм вывода экспертной системы представляет собой последовательное дерево решений, которое использовало как мультиспектральные, так и мультिवременные атрибуты архива Landsat, а также вспомогательные слои данных. В рамках механизма вывода экспертные знания были представлены в виде цепочки правил IF-THEN, которая формирует модель решения проблем, организует и контролирует шаги и данные, используемые в классификации. Авторами исследований заявлены следующие данные по эффективности экспертной системы: ложная классификация воды ниже 1 % и пропуски воды менее 5 %. Веб-интерфейс, поддерживаемый GEE, позволяет запускать экспертную систему на любых изображениях Landsat 5, 7 и 8. Доступ к коду может быть предоставлен по запросу.

Анализ пригодности наборов данных GSW для мониторинга динамики озер Казахстана был проведен не по тематическим наборам, а по исходным данным их составления. Были запрошены и загружены растровые наборы «Monthly History» и «Yearly Water Classification» (таблица 1).

Таблица 1 – Краткая характеристика тематических наборов GSW

Набор данных GSW	Краткая характеристика набора данных GSW
Water Occurrence	Отображает распространение водной поверхности между 1984 и 2019 годами – отражает как внутреннюю, так и межгодовую изменчивость и изменения. Occurrence – это измерение частоты присутствия воды (% от наблюдений). Постоянные водные поверхности – это 100 % появление воды за 35 лет
Annual Water Recurrence	Отображает межгодовую изменчивость доступности воды, т.е. как часто вода возвращается из года в год (в %). В отличие от набора «Water Occurrence» не обязательно вычисляется в полном архиве (с 1984 по 2019 год). Период отображения повторяемости воды начинается в том году, когда вода была впервые обнаружена в любом месте, и заканчивается годом, когда последний раз наблюдалась вода. 100 % повторение воды означает, что вода присутствует каждый год с самого начала из архива или с первого года наблюдения за водой
Water Occurrence Change	Отображает, где уровень поверхностных вод увеличивался, уменьшался или оставался неизменным между 1984 и 2019 годами (в %)
Maximum Water Extent	Отображает максимальное распространение обнаруженной воды за 1984-2019 гг.
Water Seasonality	Отображает информацию о внутригодовом поведении водных поверхностей номинально в год
Water Transitions	Отображает изменение состояние воды с начала года наблюдений и последнего года наблюдений

На территорию Казахстана было загружено 768 ежемесячных (снимки на период март-октябрь с 1984 по 2015 г. по 3 зонам – на территорию Казахстана приходится снимки из 3 зон и 96 годовых – снимки за 32 года по 3 зонам) растровых изображений. Следует отметить, что обновления ежемесячных и годовых наборов данных GSW за 2016–2019 гг. стали доступны позже и не использовались в этом исследовании.

Для извлечения данных по пространственно-временной динамике озер Казахстана из наборов данных GSW выполнен ряд операций геообработки как готовыми инструментами настольного программного обеспечения ArcGIS, так и специально подготовленными скриптами Python.

Площадные данные с наборов данных GSW рассчитывались в пределах маски озер Казахстана. Маска озер представляет собой векторный слой контуров озер Казахстана площадью более 1 км², оцифрованных по ДДЗ за 2015 год (снимки спутника Landsat) и откорректированных по набору данных «Maximum Water Extent». Перечень объектов слоя озер был проверен по архивным и современным топографическим картам, архивному перечню озер [15, 16] для исключения водохранилищ, сор, солончаков, болот.

Этап предварительной обработки растровых наборов данных GSW включал процессы приведения набора к общей проекции, вырезания, конвертирования векторного слоя маски озер в растр, построения атрибутивных таблиц растров, создания наборов данных мозаик. Количественные данные по динамике площадей зеркала озер из соответствующих наборов данных GSW извлекались инструментами «Зональная статистика» и «Таблица площадей».

Для анализа пригодности наборов данных GSW для мониторинга динамики озер Казахстана в первую очередь был изучен набор «Monthly History», который хранит всю историю обнаружения воды по месяцам (таблица 2). В результате обработки такого набора данных извлечены данные о площадях водной и неводной поверхности, территории без действительных наблюдений (NoData) в пределах масок озер по каждому месяцу каждого года наблюдений.

Таблица 2 – Структура таблицы атрибутов растра «Monthly History»

Канал	Описание	Значения
Monthly_Water	Обнаружение воды за месяц	0 = нет данных 1 = не вода 2 = вода

По набору данных GSW «Yearly Water Classification» в пределах масок озер извлечены значения площадей постоянной и сезонной годовой воды (таблица 3), максимальной площади озера (постоянная вода+сезонная вода), площади неводных поверхностей и % территорий без действительных данных для каждого года наблюдений.

Таблица 3 – Структура таблицы атрибутов растра «Yearly Water Classification»

Канал	Описание	Значения
Yearly_Water	Классификация сезонности воды в течение года	0 = нет данных 1 = не вода 2 = сезонная вода 3 = постоянная вода

Результаты и их обсуждение. В результате геообработки наборов данных GSW были извлечены ежемесячные и ежегодные данные по площадям 2329 озер Казахстана.

Для оценки пригодности набора «Monthly History» для исследований ежемесячной динамики площадей озер было определено количество озер (с дальнейшим пересчетом в проценты) со значениями ячеек NoData более 99; 25; 10 и 5 %, равное 2 % и менее, равное 1 % и менее. Первые две градации выбраны с целью показать долю озер, по которым невозможно извлечь данные из-за абсолютно низкого качества исходных растров, а также общую долю озер, по которым корректное восстановление данных невозможно. Градация контуров с ячейками NoData более 10 и 5 % демонстрирует общую долю озер, которые могут быть исключены из перечня озер с надежными данными, хотя ниже этих порогов могут быть достаточно корректно восстановлены различными методами.

Градации 2 % и менее, 1 % и менее представляют соответственно долю озер с высоким и очень высоким уровнем данных для оценки ежемесячной динамики площадей. Следует отметить, что различные исследователи используют исходные данные с различным порогом загрязнения (% ячеек

со значением NoData). Например, Busker и др. [6] определяют пороговое значение для использования исходных данных < 5 % ячеек NoData, Bhagwat и др. [17] – 1 % и менее. В предыдущей работе, основанной на использовании набора GSW, нами был определен пороговый уровень 2 % и менее [18].

Анализ результатов, полученных из набора «Monthly History», показал, что в пределах масок озера отмечается высокий процент ячеек со значением NoData на растрах за март, апрель и октябрь (таблица 4, осредненные данные за период).

Таблица 4 – Доля озер со значениями ячеек NoData набора «Monthly History»

Месяц	Спутник	Период	Доля озер с 99 % NoData	Доля озер с 25 % NoData	Доля озер с 10 % NoData	Доля озер с 5 % NoData	Доля озер с NoData 2 % и менее	Доля озер с NoData 1 % и менее
Март	Landsat5	1984-1999	93	98	99	99	0,5	0,4
		2000-2012	71	82	87	90	8	7
		2013-2015	57	71	80	83	13	11
Апрель	Landsat7	1984-1999	71	81	87	99	0,5	0,4
		2000-2012	25	51	71	85	7	5
		2013-2015	3	22	46	63	22	15
Октябрь	Landsat 8	1984-1999	84	93	96	98	1,4	1
		2000-2012	63	83	93	97	4,4	1,3
		2013-2015	56	73	80	85	10,7	8,7

Результаты анализа позволяют сделать вывод, что исходные наборы данных «Monthly History» за март и октябрь непригодны для исследования ежемесячной динамики. Даже снимки Landsat 8 позволяют извлечь данные только в пределах 13 % озер площадью более 1 км². Пригодность снимков на апрель также оценивается на низком уровне из-за малой доли озер, содержащих данные о распределении водной и неводной поверхности. В первую очередь большое количество ячеек со значением NoData связано с возможным снежно-ледовым покрытием озер, а также облачностью в этот период.

Доля озер, где ячейки NoData составляют 2 % и менее, по обработанным снимкам спутника Landsat 5 в среднем в мае составляла 11 %, в июне – 20,5 %, в июле – 24 %, в августе – 19 %, в сентябре – 9,3 %. Низкое количество данных о распределении водного покрова связано с низким качеством архива снимков спутника Landsat 5 на территорию Казахстана. В качестве примера представлено изображение озера Балкаш (рисунки 1).

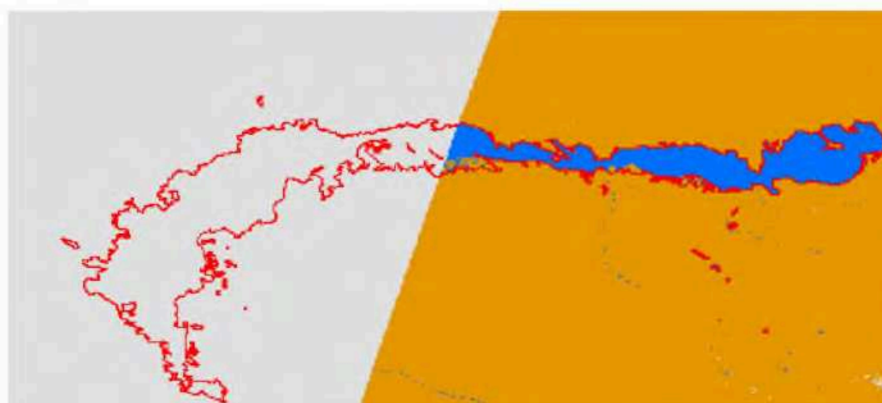


Рисунок 1 – Озеро Балкаш на изображении «Monthly History» за июль 1996 г.

ячейки со значением NoData ячейки со значением не вода ячейки со значением вода

По обработанным данным спутника Landsat 7 аналогичные осредненные данные имеют следующие значения: в мае – 34 %, в июне – 47,8 %, в июле – 55 %, в августе – 45,8 %, в сентябре – 30,5 %. Невысокие доли ячеек со значениями вода и невода связаны с нарушением работы сканера спутника Landsat 7 (рисунок 2).

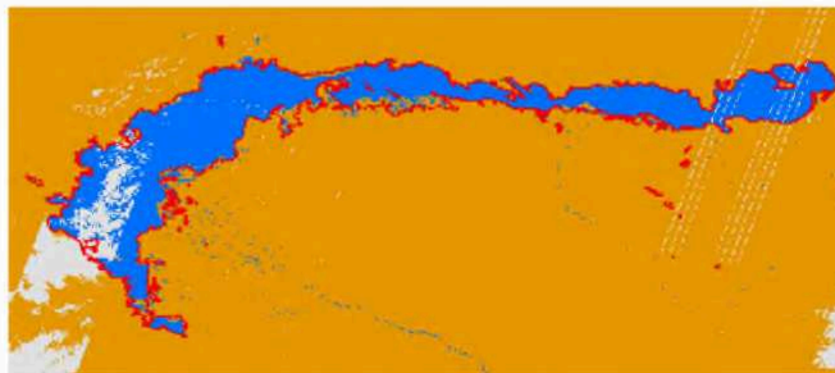


Рисунок 2 – Озеро Балкаш на изображении «Monthly History» за июль 2006 г.

Наиболее высокие доли озер, где ячейки NoData составляют 2 % и менее, регистрируются по растрам спутника Landsat 8 и составляют в среднем за май 75 %, июнь 97 %, июль 84 %, август 93 %, сентябрь 66 %.

Наблюдается общее снижение доли озер с высоким уровнем данных по распределению водной поверхности в мае и сентябре, что может быть связано с особенностями облачного режима определенных территорий Казахстана. Снижение количества ячеек со значениями NoData у данных, полученных со спутника Landsat 8 в сравнении с данными со спутников Landsat 5, связано с полнотой архива снимков и его качества, в сравнении со спутником Landsat 7 связано с отсутствием искажений, связанных со сбоем работы сканера.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что исходные данные набора «Monthly History» за март, апрель и октябрь за все 32 года не могут быть использованы в связи с отсутствием данных в ячейках, вызванных как гидроклиматическими условиями, так и качеством исходных данных. Исходные данные в остальные месяцы за 1984–1999 гг. также не позволяют их использовать для исследования динамики площадей озер из-за большого содержания ячеек NoData. Даже при снижении порогового уровня загрязнения до 5 % доля озер в среднем с мая по сентябрь составляет 14,6–28,4 %.

Исходные данные 2000–2012 гг. не содержат информации по более чем 50 % озер, за исключением июля (55 %). Однако данные за этот период могут быть дополнительно изучены для определения полноты данных для исследования динамики отдельных озер. При включении озер до 5 % NoData доля озер с мая по сентябрь изменяется от 49,6 до 61,2 %.

Данные, полученные в результате обработки снимков спутника Landsat 8, несомненно могут быть использованы для отслеживания динамики площадей, особенно данные за летние месяцы, однако даже с учетом обновлений набора с 2016 по 2019 год временной ряд не является репрезентативным.

Полученные по набору «Monthly History» данные о площадях озер не валидированы в связи с отсутствием в доступе ежемесячных данных о площадях и уровнях мониторинговых озер Казахстана.

В настоящий момент опубликован ряд работ по восстановлению ячеек NoData с описанием различных методов автоматизированного обнаружения воды [19, 20] и др., которые следует изучить с точки зрения применения и возможности валидации результатов.

В результате обработки набора исходных данных «Yearly Water Classification» были извлечены данные о площадях сезонной и постоянной годовой воды (рисунок 3), площади неводной поверхности и % ячеек с отсутствием действительных наблюдений (NoData).

Name	Year	Постоянная_вода	Сезонная_вода	Не вода	Нет данных	Процент нет данных
оз. Кусмурын	1984	184,50	3,90	275,80	75,94	16,36
оз. Кусмурын	1985	408,29	55,90	0,00	464,20	100,00
оз. Кусмурын	1986	277,29	57,43	129,48	0,47	0,10
оз. Кусмурын	1987	378,25	40,48	45,46	0,25	0,05
оз. Кусмурын	1988	408,29	55,90	0,00	464,20	100,00
оз. Кусмурын	1989	400,30	53,33	10,59	388,42	83,68
оз. Кусмурын	1990	401,28	60,33	2,60	33,96	7,32
оз. Кусмурын	1991	394,27	54,26	15,67	0,00	0,00
оз. Кусмурын	1992	394,38	42,40	27,42	44,71	9,63
оз. Кусмурын	1993	398,61	58,42	7,16	1,64	0,35
оз. Кусмурын	1994	399,58	64,41	0,21	0,03	0,01
оз. Кусмурын	1995	400,24	63,77	0,18	3,64	0,78
оз. Кусмурын	1996	399,21	63,69	1,30	0,68	0,15
оз. Кусмурын	1997	408,29	55,90	0,00	464,20	100,00
оз. Кусмурын	1998	399,82	31,41	32,96	71,28	15,36
оз. Кусмурын	1999	374,10	15,65	74,43	38,66	8,33
оз. Кусмурын	2000	328,71	57,45	78,03	0,25	0,05
оз. Кусмурын	2001	355,03	26,24	82,93	11,41	2,46
оз. Кусмурын	2002	390,16	43,71	30,34	2,50	0,54
оз. Кусмурын	2003	390,97	31,79	41,44	11,43	2,46
оз. Кусмурын	2004	356,61	46,44	61,15	0,70	0,15
оз. Кусмурын	2005	375,61	38,17	50,41	0,85	0,18
оз. Кусмурын	2006	352,96	49,08	62,16	1,32	0,29
оз. Кусмурын	2007	377,23	52,55	34,42	0,07	0,02
оз. Кусмурын	2008	371,82	38,65	53,73	0,01	0,00
оз. Кусмурын	2009	330,88	58,56	74,76	0,00	0,00
оз. Кусмурын	2010	218,85	118,14	127,20	0,00	0,00
оз. Кусмурын	2011	168,59	103,48	192,13	0,34	0,07
оз. Кусмурын	2012	224,76	60,27	179,17	0,56	0,12
оз. Кусмурын	2013	137,18	103,70	223,32	0,00	0,00
оз. Кусмурын	2014	80,25	175,32	208,63	0,00	0,00
оз. Кусмурын	2015	155,63	121,69	186,89	0,00	0,00

Рисунок 3 – Фрагмент данных, извлеченных с набора «Yearly Water Classification» по озеру Кусмурын

Для оценки пригодности набора GSW «Yearly Water Classification» определены доли озер по уровням загрязнения (градациям по количеству ячеек со значением NoData). Результаты представлены в таблице 5.

Анализ таблицы показывает, что данные с продуктов GSW, созданных на основе спутника Landsat 5, имеют большой разброс в количестве озер, соответствующих пороговому значению 2 % и менее, от 4,5 % в 1996 до 72,9 % в 1991 г. При пороговом значении 5 % – соответственно от 8,1 до 81,4 %. Набор данных «Yearly Water Classification» за этот период может быть рекомендован для исследования динамики озер только по отдельным годам или по отдельным озерам в случае превышения порогового значения ячеек с NoData.

Данные с набора «Yearly Water Classification» за 2000–2012 гг. имеют относительно высокое количество данных с информацией о распределении водной поверхности, за исключением данных за 2003 г. (в 2003 г. произошел сбой работы сканера спутника Landsat 7). Набор данных «Yearly Water Classification» однозначно пригоден для извлечения данных о межгодовой изменчивости площадей озер Казахстана, за исключением растра за 2003 г., который при установлении порога 5 % позволяет извлекать данные почти с 60 % озер.

Данные с набора «Yearly Water Classification» с 2013 г. имеют очень высокое качество данных и при установке 5 % порогового уровня могут использоваться для 100 озер Казахстана площадью более 1 км².

Таблица 5 – Доля озер со значениями ячеек NoData набора «Yearly Water Classification»

Год	Доля озер с 99 % NoData	Доля озер с 25 % NoData	Доля озер с 10 % NoData	Доля озер с 5 % NoData	Доля озер с NoData 2 % и менее	Доля озер с NoData 1 % и менее
1984	56,5	65,2	71,5	76,8	17,5	13,4
1985	44,8	50,8	56,0	60,7	32,5	27,6
1986	26,4	27,5	29,2	31,7	64,1	60,4
1987	25,5	26,5	28,4	31,4	63,2	59,0
1988	74,0	75,9	76,9	78,0	19,8	18,4
1989	15,2	29,9	39,5	47,0	42,6	35,3
1990	10,4	27,4	37,0	43,1	48,5	41,7
1991	1,7	6,8	12,5	18,6	72,9	65,9
1992	3,2	23,0	38,7	51,4	33,7	26,1
1993	0,3	5,9	13,1	20,7	66,7	57,5
1994	0,5	8,0	16,1	22,3	67,8	58,9
1995	36,9	55,9	67,2	73,8	19,2	15,0
1996	10,8	28,7	39,8	48,9	40,5	33,1
1997	68,7	82,9	88,9	91,9	4,5	3,1
1998	3,3	26,6	42,8	54,1	33,1	26,4
1999	1,7	27,9	42,6	54,5	31,7	22,3
2000	0,0	2,1	5,0	9,0	84,1	75,6
2001	0,0	2,9	6,9	12,6	78,5	68,9
2002	0,0	2,1	5,6	11,2	78,9	69,7
2003	0,5	14,9	28,5	40,2	46,0	36,8
2004	0,0	1,3	4,2	8,2	85,1	78,9
2005	0,0	0,9	3,8	8,2	82,9	75,1
2006	0,0	2,7	5,9	10,5	81,9	74,5
2007	0,0	0,0	0,2	1,2	96,7	94,2
2008	0,0	0,0	0,1	0,8	97,9	95,7
2009	0,0	0,0	0,0	0,0	99,4	98,2
2010	0,0	0,0	0,1	0,5	97,9	95,8
2011	0,0	0,0	0,3	1,0	97,5	95,0
2012	0,0	0,1	0,6	1,5	95,4	92,0
2013	0,0	0,0	0,0	0,4	98,5	97,4
2014	0,0	0,0	0,0	0,0	99,7	98,9
2015	0,0	0,0	0,0	0,2	99,6	99,4

Однако нами были отмечены случаи, когда озера, покрытые растительностью или содержащие большое количество соли, неправильно интерпретировались экспертной системой при создании наборов GSW. Ниже приведен пример такого озера (рисунок 4).

Валидация данных по максимальной площади воды (сезонная вода+постоянная вода), полученных с набора «Yearly Water Classification», проводилась по данным наблюдений уровня воды по трем мониторинговым озерам – Балкаш, Алаколь, Улкен Шортанды. Для корреляции были выбраны года, в которых пороговый уровень ячеек NoData был 2 % и меньше. Для озера Балкаш коэффициент корреляции составил 0,97 (по 20 годам), для Алаколя – 0,94 (по 21 году), для Улкен Шортанды – 0,95 (по 10 годам). Высокие уровни корреляции данных по наблюдаемым уровням воды и извлеченными с набора «Yearly Water Classification»



Рисунок 4 – Изображение озера Сарыоба на космическом снимке Landsat 2015

данными площадей водной поверхности позволяют рассматривать набор «Yearly Water Classification» в качестве одного из надежных источников для исследования динамики озер.

Закключение. В результате доступности для исследователей таких облачных технологий, как GEE, позволяющих одновременно обрабатывать огромный массив разновременных данных ДЗЗ, появляются открытые глобальные наборы данных, которые являются ценными источниками информации для устранения пробелов в данных по динамике поверхностных вод.

При анализе наборов данных GWS положительно оценена пригодность использования данных GWS для межгодовой оценки динамики площадей озер Казахстана, пригодность ежемесячных растровых наборов остается под вопросом до выяснения возможности их использования для отдельных озер, а также восстановления данных.

Возможность извлечения данных в виде площадей годовых сезонной и постоянной воды играет большую роль в повышении эффективности использования озерной воды. Выходной формат данных в виде векторного слоя масок озер и связанных с ним табличных данных, полученных в результате обработки наборов GSW, позволяет легко и быстро проводить анализ озер по стабильности или высокой изменчивости их площадей, например определить озера, когда-либо пересыхавшие за период съемки спутников Landsat, или озера, имеющие более 90 % площади постоянной воды на всем протяжении наблюдений. Полученные в результате обработки наборов GSW данные можно анализировать вместе с наборами данных основных климатических показателей для определения влияния климата на динамику площадей озер. Результаты работ по динамике площадей озер вкупе с данными по качеству воды обеспечат информационно-картографическую и аналитическую поддержку принятия решений по использованию ресурсов озер.

Исследование динамики озер Казахстана по открытым глобальным данным о Земле, в том числе по наборам GSW, не ограничивается результатами только данной работы ввиду необходимости дальнейшего изучения и улучшения глобальных наборов для извлечения более полных и качественных данных. Также необходимо подготовить и представить анализы данных по динамике озер Казахстана площадью более 1 км², дополнив материалы для анализа новыми данными с наборов данных GSW за 2016–2019 гг.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sudmanns, Martin & Tiede, Dirk & Lang, Stefan & Bergstedt, Helena & Trost, Georg & Augustin, Hannah & Baraldi, A. & Blaschke, Thomas. (2019). Big Earth data: disruptive changes in Earth observation data management and analysis? // *International Journal of Digital Earth*. DOI: 10.1080/17538947.2019.1585976.
- [2] Casu, F., Manunta, M., Agram, P.S., & Crippen, R.E. (2017). Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences // *Remote Sensing of Environment*, 202, 1–2. DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.013.
- [3] Gorelick, Noel, et al., (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sensing of Environment*. Vol. 202. P. 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- [4] Tortini, Riccardo & Noujdina, Nina & Yeo, Samantha & Ricko, Martina & Birkett, Charon & Khandelwal, Ankush & Kumar, Vipin & Marlier, Miriam & Lettenmaier, Dennis. (2020). Satellite-based remote sensing data set of global surface water storage change from 1992 to 2018. *Earth System Science Data*. 12. 1141–1151. DOI: 10.5194/essd-12-1141-2020.
- [5] Shuangxiao Luo, Chunqiao Song, Kai Liu, Linghong Ke and Ronghua Ma. (2019) An Effective Low-Cost Remote Sensing Approach to Reconstruct the Long-Term and Dense Time Series of Area and Storage Variations for Large Lakes // *Sensors*. 19, 4247. P. 18. DOI:10.3390/s19194247.
- [6] Busker, Tim & Roo, Ad & Gelati, Emiliano & Schwatke, Christian & Adamovic, Marko & Bisselink, Berny & Pekel, J.-F & Cottam, Andrew. (2019). A global lake and reservoir volume analysis using a surface water dataset and satellite altimetry // *Hydrology and Earth System Sciences*. 23. 669–690. DOI: 10.5194/hess-23-669-2019.
- [7] Christopher J. Jarchow, Brent H. Sigafus., et al. (2020) Using Full and Partial Unmixing Algorithms to Estimate the Inundation Extent of Small, Isolated Stock Ponds in an Arid Landscape // *Wetlands*. 40. P. 563–575. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01201-7>.
- [8] Andrew Ogilvie, Gilles Belaud., et al., (2018) Surface water monitoring in small water bodies: potential and limits of multi-sensor Landsat time series // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* P. 35. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-19>.
- [9] Jia, Gensuo & Zhang, Li & Zhu, Lanwei & Xu, Ronghan & Liang, Dong & Xu, Xiyan & Bao, Tao. (2019). Digital Earth for Climate Change Research. DOI: 10.1007/978-981-32-9915-3_14.
- [10] Jin-Ming, Yang & Li-Gang, Ma & Cheng-Zhi, Li & Yang, Liu & Jian-li, Ding & Sheng-Tian, Yang. (2019). Temporal-spatial variations and influencing factors of Lakes in inland arid areas from 2000 to 2017: a case study in Xinjiang // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 10. 519–543. DOI: 10.1080/19475705.2018. 1531942.
- [11] Bai, Jie & Chen, Xi & Li, Junli & Yang, Liao & Fang, Hui. (2011). Changes in the Area of Inland Lakes in Arid Regions of Central Asia during the Past 30 Years // *Environmental monitoring and assessment*. 178. 247–56. doi:10.1007/s10661-010-1686-y.
- [12] Reis, Vanessa & Hermoso, Virgilio & Hamilton, Stephen & Ward, Douglas & Fluet-Chouinard, Etienne & Lehner, Bernhard & Linke, Simon. (2017). A Global Assessment of Inland Wetland Conservation Status // *BioScience*. 67. 523–533. DOI: 10.1093/biosci/bix045.

- [13] Li, B., Zhang, Y.-C., Wang, P., Du, C.-Y., & Yu, J.-J. (2019). Estimating Dynamics of Terminal Lakes in the Second Largest Endorheic River Basin of Northwestern China from 2000 to 2017 with Landsat Imagery // *Remote Sensing*, 11(10), 1164. doi:10.3390/rs11101164.
- [14] Pekel, J.-F & Cottam, Andrew & Gorelick, Noel & Belward, Alan. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature*. 540. 10.1038/nature20584.
- [15] Филонетц П.П., Омаров Т.Р. Озера Казахстана: Альбом-справочник. В 2 т. – Алма-Ата, 1987. – Т. 1. – 209 с.
- [16] Филонетц П.П., Омаров Т.Р. Озера Центрального и Южного Казахстана: (Справочник). – Алма-Ата: Изд-во «Наука» Казахской ССР, 1973. – 198 с.
- [17] Bhagwat, T., Klein, I., Huth, J., & Leinenkugel, P. (2019). Volumetric Analysis of Reservoirs in Drought-Prone Areas Using Remote Sensing Products // *Remote Sensing*, 11(17), 1974. DOI: 10.3390/rs11171974.
- [18] Төлепбаева А.К., Тұмажанова С.О., Карагулова Р.К., Танбаева А.А., Искалиева Г. М. Жерді қапшықтықтан зондтау негізіндегі ғаламдық деректер базасы: Ертіс өзені жайылмасының мысалында // *Вестник КазНУ. Серия географическая*. – 2020. – № 2(57). – С. 16-25.
- [19] Yao, F., Wang, J., Wang, C., & Crétau, J.-F. (2019). Constructing long-term high-frequency time series of global lake and reservoir areas using Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*, 232, 111210. doi:10.1016/j.rse.2019.111210.
- [20] Zhao, Gang & Gao, Huilin. (2018). Automatic Correction of Contaminated Images for Assessment of Reservoir Surface Area Dynamics // *Geophysical Research Letters*. 45. 10.1029/2018GL078343.

REFERENCES

- [1] Sudmanns, Martin & Tiede, Dirk & Lang, Stefan & Bergstedt, Helena & Trost, Georg & Augustin, Hannah & Baraldi, A. & Blaschke, Thomas. (2019). Big Earth data: disruptive changes in Earth observation data management and analysis? // *International Journal of Digital Earth*. DOI: 10.1080/17538947.2019.1585976.
- [2] Casu, F., Manunta, M., Agram, P. S., & Crippen, R. E. (2017). Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences // *Remote Sensing of Environment*, 202, 1–2. DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.013.
- [3] Gorelick, Noel., et al., (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sensing of Environment*. Vol. 202. P. 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- [4] Tortini, Riccardo & Noujdina, Nina & Yeo, Samantha & Ricko, Martina & Birkett, Charon & Khandelwal, Ankush & Kumar, Vipin & Marlier, Miriam & Lettenmaier, Dennis. (2020). Satellite-based remote sensing data set of global surface water storage change from 1992 to 2018 // *Earth System Science Data*. 12. 1141-1151. DOI: 10.5194/essd-12-1141-2020.
- [5] Shuangxiao Luo, Chunqiao Song, Kai Liu, Linghong Ke and Ronghua Ma. (2019) An Effective Low-Cost Remote Sensing Approach to Reconstruct the Long-Term and Dense Time Series of Area and Storage Variations for Large Lakes // *Sensors*. 19, 4247. P. 18. DOI:10.3390/s19194247.
- [6] Busker, Tim & Roo, Ad & Gelati, Emiliano & Schwatke, Christian & Adamovic, Marko & Bisselink, Berny & Pekel, J.-F & Cottam, Andrew. (2019). A global lake and reservoir volume analysis using a surface water dataset and satellite altimetry // *Hydrology and Earth System Sciences*. 23. 669-690. DOI: 10.5194/hess-23-669-2019.
- [7] Christopher J. Jarchow, Brent H. Sigafus., et al. (2020) Using Full and Partial Unmixing Algorithms to Estimate the Inundation Extent of Small, Isolated Stock Ponds in an Arid Landscape // *Wetlands*. 40. P. 563–575. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01201-7>.
- [8] Andrew Ogilvie, Gilles Belaud., et al., (2018) Surface water monitoring in small water bodies: potential and limits of multi-sensor Landsat time series // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*. P. 35. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-19>.
- [9] Jia, Gensuo & Zhang, Li & Zhu, Lanwei & Xu, Ronghan & Liang, Dong & Xu, Xiyan & Bao, Tao. (2019). Digital Earth for Climate Change Research. DOI: 10.1007/978-981-32-9915-3_14.
- [10] Jin-Ming, Yang & Li-Gang, Ma & Cheng-Zhi, Li & Yang, Liu & Jian-li, Ding & Sheng-Tian, Yang. (2019). Temporal-spatial variations and influencing factors of Lakes in inland arid areas from 2000 to 2017: a case study in Xinjiang // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 10. 519-543. DOI: 10.1080/19475705.2018. 1531942.
- [11] Bai, Jie & Chen, Xi & Li, Junli & Yang, Liao & Fang, Hui. (2011). Changes in the Area of Inland Lakes in Arid Regions of Central Asia during the Past 30 Years // *Environmental monitoring and assessment*. 178. 247-56. doi:10.1007/s10661-010-1686-y.
- [12] Reis, Vanessa & Hermoso, Virgilio & Hamilton, Stephen & Ward, Douglas & Fluet-Chouinard, Etienne & Lehner, Bernhard & Linke, Simon. (2017). A Global Assessment of Inland Wetland Conservation Status // *BioScience*. 67. 523-533. DOI: 10.1093/biosci/bix045.
- [13] Li, B., Zhang, Y.-C., Wang, P., Du, C.-Y., & Yu, J.-J. (2019). Estimating Dynamics of Terminal Lakes in the Second Largest Endorheic River Basin of Northwestern China from 2000 to 2017 with Landsat Imagery // *Remote Sensing*, 11(10), 1164. doi:10.3390/rs11101164
- [14] Pekel, J.-F & Cottam, Andrew & Gorelick, Noel & Belward, Alan. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature*. 540. 10.1038/nature20584.
- [15] Филонетц П.П., Омаров Т.Р. Lakes of Kazakhstan: Album-guide in 2 volumes. Alma-Ata, 1987. Vol. 1. 209 p. (in Rus.).
- [16] Филонетц П.П., Омаров Т.Р. Lakes of Central and Southern Kazakhstan (Directory). Alma-Ata: Publishing house of Science of the Kazakh SSR, 1973. 198 p. (in Rus.).
- [17] Bhagwat, T., Klein, I., Huth, J., & Leinenkugel, P. (2019). Volumetric Analysis of Reservoirs in Drought-Prone Areas Using Remote Sensing Products // *Remote Sensing*, 11(17), 1974. DOI: 10.3390/rs11171974.
- [18] Төлепбаева А.К., Тұмажанова С.О., Карагулова Р.К., Танбаева А.А., Искалиева Г.М. Global database based on remote sensing of the Earth: on the example of the Ertis river floodplain // *Al-Farabi Kazakh National University Journal of Geography and Environmental Management*. 2020. N 2(57). P. 16-25. DOI: org/10.26577/JGEM.2020.v57.i2.02. (in Kaz.).

[19] Yao, F., Wang, J., Wang, C., & Crétau, J.-F. (2019). Constructing long-term high-frequency time series of global lake and reservoir areas using Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*, 232, 111210. doi:10.1016/j.rse.2019.111210.

[20] Zhao, Gang & Gao, Huilin. (2018). Automatic Correction of Contaminated Images for Assessment of Reservoir Surface Area Dynamics // *Geophysical Research Letters*. 45. 10.1029/2018GL078343.

Д. К. Абиева¹, Р. Қ. Қарағұлова², К. А. Аюпов³, А. К. Төлепбаева⁴, Ғ. М. Уразбаева⁵

¹Г.ғ.к., Геоақпараттық технологиялар орталығының басқарушы директоры
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан)

²Г.ғ.к., Географиялық ақпараттық жүйелер зертханасының меңгерушісі
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан)

³Жерді қашықтықтан барлау департаментінің Құрғақшылық жағдайларының мониторингі орталығының бастығы («Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ, Алматы, Қазақстан)

⁴Географиялық ақпараттық жүйелер зертханасының ғылыми қызметкері
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан)

⁵Географиялық ақпараттық жүйелер зертханасының аға ғылыми қызметкері
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан)

ҚАЗАҚСТАН КӨЛДЕРІ АУДАНЫНЫҢ ДИНАМИКАСЫН ЗЕРТТЕУҮШІН ЖЕРБЕТІ СУЛАРЫН ҒАЛАМДЫҚ ЗЕРТТЕУ ДЕРЕКТЕР ЖИЫНТЫҒЫНЫҢ (GLOBAL SURFACE WATER) ЖАРАМДЫЛЫҒЫН ТАЛДАУ

Аннотация. Қазақстан көлдерінің аудандарының жыл аралық және жыл ішіндегі динамикасын зерттеу үшін жер беті суларын ғаламдық зерттеудің жалпыға қол жетімді деректер жиынтығын (Global Surface Water, GSW) пайдалану мүмкіндіктері қарастырылған. Қазақстанның ауданы 1 км²-ден жоғары көлдерінің маскалары арқылы көлдердің су айнасы туралы айлық деректер, тұрақты және маусымдық суы туралы жылдық деректер алу үшін GWS мәліметтер жиынтықтарын өңдеу әдістемесі сипатталған.

Мәні NoData болатын ұяшықтардың шектік санына тең көлдер үлесін анықтау негізінде нәтижелерді талдау Қазақстанның ауданы 1 км²-ден жоғары көлдерінің аудандарының динамикасын зерттеу үшін GWS «Monthly History» және «Yearly Water Classification» деректер жиынтықтарының жарамдылығын бағалауға мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: жербеті суларын зерттеудің ғаламдық жиынтықтары, Global Surface Water (GSW), Жерді қашықтықтан зондау (ЖҚЗ), Қазақстан көлдері, көл аудандарының жыл аралық және жыл ішіндегі динамикасы.

D. K. Abiyeva¹, R. K. Karagulova², K. A. Ayupov³, A. K. Tolepbayeva⁴, G. M. Urazbayeva⁵

¹Candidate of geographical sciences, managing director of the center of GIS technologies
(JSC «Institute of geography and water security», Almaty, Kazakhstan)

²Candidate of geographical sciences, head of GIS department
(JSC «Institute of geography and water security», Almaty, Kazakhstan)

³Head of the Drought Condition Monitoring Center of the department of Earth Remote Sensing
(JSC «National Center of Space Research and Technology», Almaty, Kazakhstan)

⁴Research worker of GIS department (JSC «Institute of geography and water security», Almaty, Kazakhstan)

⁵Senior researcher of GIS department (JSC «Institute of geography and water security», Almaty, Kazakhstan)

ANALYSIS OF SUITABILITY OF GLOBAL SURFACE WATER DATA SETS FOR STUDYING THE DYNAMICS OF THE LAKE AREAS IN KAZAKHSTAN

Abstract. The article discusses the possibilities of using publicly available datasets of global surface water studies (GSW) for studying inter-annual and intra-annual dynamics of the lakes areas in Kazakhstan. A technique for processing GSW datasets for extracting (by masks of lakes in Kazakhstan with an area of more than 1 km²) monthly data on the water surface, annual data on constant and seasonal waters is described. The analysis of the results, based on the determination of the proportion of lakes with the threshold value of the cells with the NoData value, made it possible to assess the suitability of the GSW datasets "Monthly History" and "Yearly Water Classification" for studying the dynamics of the lake areas in Kazakhstan with the area of more than 1 km².

Keywords: datasets of global surface water studies, Global Surface Water (GSW), Earth remote sensing, lakes of Kazakhstan, inter-annual and intra-annual dynamics of the lakes areas.