НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 4, с. 86–93 **http://www.izdatgeo.ru**

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 551.332.56:528.88

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОЩАДИ ВОДОЕМОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ РАЗЛИЧНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

С.Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия; spaceakm2@ogri.ru

На примере внутренних водоемов западного побережья полуострова Ямал (район Марре-Сале) исследованы погрешности измерения их площади по данным съемки со спутников GeoEye-1 и Landsat 5. Показано, что при классификации водоемов по многозональным космическим снимкам погрешность измерения их площади существенно зависит от задаваемого числа классов типов земной поверхности. Определены эмпирические уравнения зависимости погрешности от площади водоемов и пространственного разрешения используемых данных космической съемки.

Термокарстовые озера, площадь водоемов, погрешность измерения, космические снимки, пространственное разрешение

ASSESSMENT ACCURACY OF MEASUREMENT OF THE WATER BODY AREA IN THE PERMAFROST USING DIFFERENT SPATIAL RESOLUTION SATELLITE IMAGERY

S.G. Kornienko

Oil and Gas Research Institute, RAS, 119333, Moscow, Gubkina str., 3, Russia; spaceakm2@ogri.ru

On the example of the inland water bodies of the West coast of the Yamal Peninsula (district Marre-Sale) the error of measurement of their areas according to the shooting from the satellites GeoEye-1 and Landsat 5 has been examined. It has been demonstrated that at the classification of water body on multispectral space images the measurement error of their areas depends substantially on the specified number of classes' types of the earth's surface. Empirical equations of dependence of the error from the water body square and spatial resolution of the data satellite imagery have been defined.

Thermokarst lakes, water body square, measurement error, space images, spatial resolution

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение экологической и промышленной безопасности при освоении районов Арктики и субарктики во многом обусловлено своевременным выявлением участков развития опасных экзогенных геологических и геокриологических процессов. К числу важнейших ландшафтных индикаторов, характеризующих состояние и динамику криолитозоны, относятся внутренние водоемы, в первую очередь термокарстовые озера. Изменение площади водоемов (ПВ) в криолитозоне может быть связано как с природными (метеорологическими, климатическими, тектоническими) процессами, так и с антропогенным воздействием. Использование водоемов в качестве индикаторов для изучения подобных процессов возможно при достоверной количественной оценке их морфометрических характеристик, прежде всего площади, что может быть реализовано на основе космических снимков (КС) различного пространственного разрешения.

В последние годы изучению состояния водоемов в криолитозоне и их динамики с использованием КС посвящено достаточно много работ, в том числе касающихся количественных оценок изменения ПВ [*Брыксина, Полищук, 2009; Днепровская и др., 2009; Кравцова, Быстрова, 2009; Елсаков, Марущак, 2011; Кравцова, Тарасенко, 2011; Баранов и др., 2012; Frohn et al., 2005; Chen et al., 2013*]. Результаты этих исследований дают полезную информацию для анализа и прогнозирования глобальных, региональных и локальных природных и антропогенных процессов в арктической зоне. В то же время во многих работах вопросы оценки погрешностей измерения ПВ рассматриваются не-достаточно подробно или не отражены совсем, что затрудняет характеристику значимых изменений ПВ.

Проблеме оценки погрешностей до настоящего времени не уделялось достаточного внимания, из-за чего практически невозможно провести обобщение работ по этой теме, сравнить результаты, разработать рекомендации и нормативы для более широкого применения метода в научных и практических целях. К немногочисленным исследованиям, касающимся этого вопроса, можно отнести работы [*Брыксина, Полищук, 2013; Chirico, Malpeli, 2012*]. Между тем в полной мере не рассмотрены методические аспекты, связанные с количественной оценкой ПВ по КС, а также факторы, влияющие на погрешность измерения площади. Не определены уравнения, характеризующие связь погрешности измерения ПВ с их размерами и пространственным разрешением используемых съемочных систем. Очевидно, что решение этих ключевых задач позволит более достоверно оценивать динамику водоемов термокарстового или иного происхождения, а также значимые изменения их площади с целью изучения природных и антропогенных процессов в криолитозоне. В настоящей работе на примере внутренних водоемов западного побережья п-ова Ямал исследованы погрешности измерения их площади по КС различного пространственного разрешения, которые получены со спутников GeoEye-1 и Landsat 5.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОЩАДИ ВОДОЕМОВ ПО КОСМОСНИМКАМ

Погрешность измерения ПВ по КС зависит от параметров самого водоема (площади, извилистости береговой линии, прозрачности воды), технических характеристик съемочной системы (пространственного разрешения, спектральных диапазонов, углов съемки), условий съемки (освещенности, состояния атмосферы) и методик обработки данных (алгоритмов классификации, комбинации спектральных каналов). При прочих равных условиях погрешность растет с уменьшением ПВ и увеличением степени извилистости его береговой линии [*Брыксина, Полищук, 2013*]. Известно, что для оценки морфометрических характеристик водных объектов в оптическом диапазоне наиболее приемлема ближняя инфракрасная (ИК) зона спектра [*Кондратьев, Шумаков, 1990*]. В то же время этот диапазон используется для определения относительной прозрачности воды до глубины менее 2 м, содержания хлорофилла *a* (>10 мг/л) и концентрации взвешенных веществ неорганического происхождения (>10 мг/л) [*Кондратьев, Шумаков, 1990*]. При высокой мутности мелководных участков можно перепутать участки водной поверхности с участками суши, что приводит к увеличению погрешности.

Погрешность растет при снижении пространственного разрешения КС и увеличении угла съемки от местной нормали (надира). С точки зрения минимизации погрешности последний фактор свидетельствует о преимуществе оптических систем перед радиолокационными при прочих равных условиях. Однако сплошная облачность исключает использование оптических систем, и даже незначительное ухудшение пропускания атмосферы приводит к снижению контрастов между участками суши и воды, что, в свою очередь, вызывает рост погрешности. При применении оптических систем погрешность будет увеличиваться при снижении освещенности, в частности при уменьшении угла стояния солнца по отношению к горизонту. Указанные факторы являются объективными источниками погрешности, и их необходимо иметь в виду при подборе и анализе данных.

Точность измерения ПВ существенно зависит от применяемых методик обработки данных, в первую очередь от используемой комбинации спектральных каналов и алгоритмов выделения (классификации) участков водной поверхности. Это означает, что при обработке одних и тех же исходных данных по разным методикам результаты и величина погрешности могут различаться. В работах [*Кравцова, Быстрова, 2009; Кравцова, Тарасенко, 2011*] при картировании термокарстовых озер по данным спутника Landsat 5 использовался один канал ближней ИК-зоны и алгоритм классификации с обучением. В работе [*Елсаков, Марущак, 2011*] применялись алгоритмы Tasseled Cap и декомпозиции смешанных пикселей, что предполагает использование всех спектральных каналов, кроме шестого (теплового). При исследовании динамики водоемов по КС спутника GeoEye-1 использовался канал ближней ИК-зоны спектра и алгоритм неконтролируемой классификации [*Chirico, Malpeli, 2012*].

Основная проблема при оценке погрешности измерения ПВ по КС заключается в выборе эталонных водоемов разной площади, относительно которых должна определяться погрешность. Картографические материалы малоэффективны для выбора эталонных водоемов, поскольку карты создаются достаточно длительное время и площадь на них имеет усредненный характер. Более достоверно анализ погрешностей измерения ПВ может быть проведен на эталонных водоемах, выделенных по аэрофотоснимкам или КС сверхвысокого (метрового и субметрового) пространственного разрешения с таких спутников, как Ikonos, WorldWiew-1, WorldWiew-2, QuickBird, GeoEye-1 [*Елсаков, Марущак, 2011; Брыксина, Полищук, 2013; Frohn et al., 2005; Chirico, Malpeli, 2012*]. В криолитозоне в летний период площадь водоема очень динамична [*Баранов и др., 2012*] и существенно зависит от метеоусловий, в первую очередь от количества осадков [*Кравцова, Тарасенко, 2011*], поэтому для корректных оценок погрешности необходима максимальная близость дат съемки используемых КС более высокого и более низкого пространственного разрешения.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОЩАДИ ВОДОЕМОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА GEOEYE-1

Оценка погрешности измерения ПВ по многозональному КС со спутника GeoEye-1 проводилась по группе из 170 водоемов общей площадью около 3,9 км^2, расположенных в районе полярной станции Марре-Сале на западном побережье п-ова Ямал (рис. 1). Район исследований площадью около 30 км^2 характеризуется широким распространением залегающих близко к поверхности мощных подземных льдов [*Крицук, 2010*]. Наиболее крупные водоемы, так же как и хасыреи, имеют округлую или вытянутую овальную форму, что является признаком их термокарстового происхождения. В выборке минимальная площадь отдельного водоема составляла 69 м^2, максимальная – 1,24 км^2 (оз. Сюртяв-Малто). В работе использовался КС спутника GeoEye-1 от 22.07.2009 г. съемки с пространственным разрешением 0,5 м в панхроматическом канале (0,45–0,90 мкм) и 2,0 м в четырех спектральных каналах (0,45–0,52, 0,52–0,60, 0,625–0,795, 0,76–0,90 мкм). Обработка и анализ данных проводились с помощью программного комплекса ENVI 4.8. Эталонные водоемы, относительно которых определялась ПВ по многозональным КС со спутников GeoEye-1 и Landsat 5, были дешифрированы вручную по снимку панхроматического канала спутника GeoEye-1. Относительная погрешность и модуль относительной погрешности измерения ПВ вычислялись по формулам

$$\delta = \frac{S_r - S}{S_r} \cdot 100\ \% \quad \text{и} \quad |\delta| = \frac{|S_r - S|}{S_r} \cdot 100\ \%,$$

где S_r – площадь эталонного водоема; S – площадь водоема по многозональным КС со спутников GeoEye-1 или Landsat 5. Модуль относительной погрешности в данном случае принят в качестве основного параметра, характеризующего точность измерения ПВ.

Учитывая полную синхронность панхроматической и многозональной съемки со спутника GeoEye-1, значения погрешности измерения ПВ по многозональному КС могут быть связаны только с особенностями водоемов и методами обработки исходных данных. Для выделения водоемов по многозональному КС спутника GeoEye-1 были опробованы различные алгоритмы классификации, представленные в комплексе ENVI 4.8. Результаты классификации по алгоритмам с обучением в данном случае оказались менее точными, что, по-видимому, связано с большим числом мелководных участков (<2 м) и(или) высокой мутностью воды некоторых из них. Не исключено, что обучающие выборки не охватывали весь диапазон

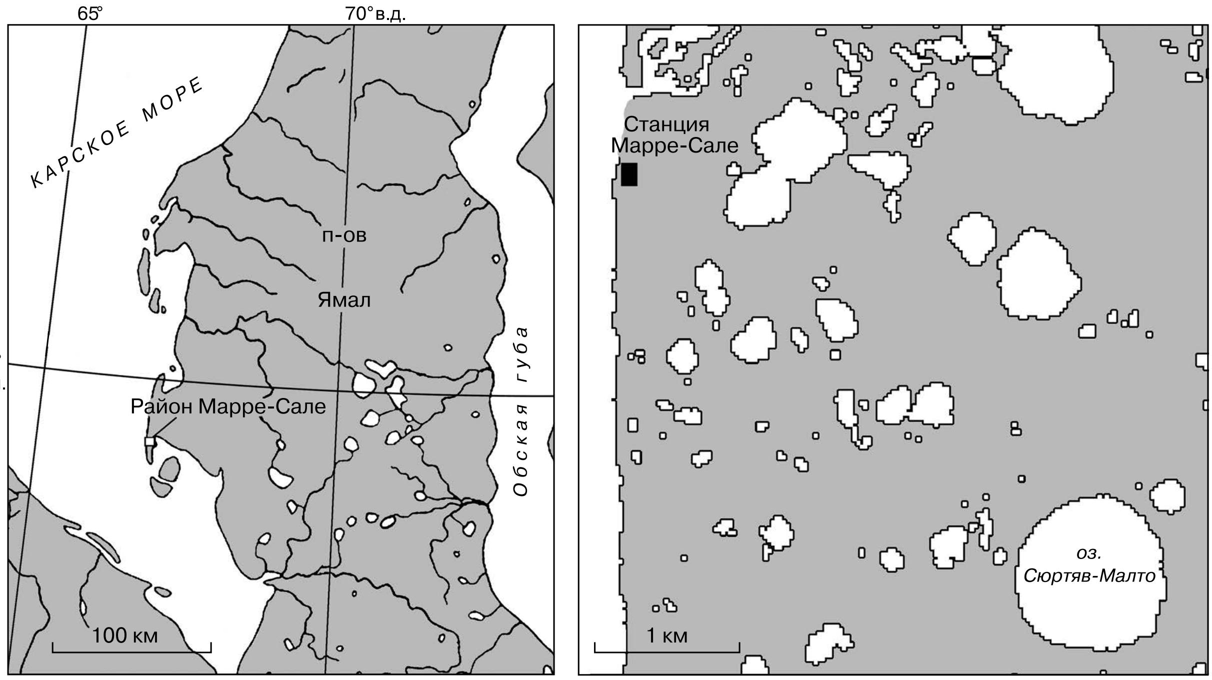

Рис. 1. Схема расположения района исследований.

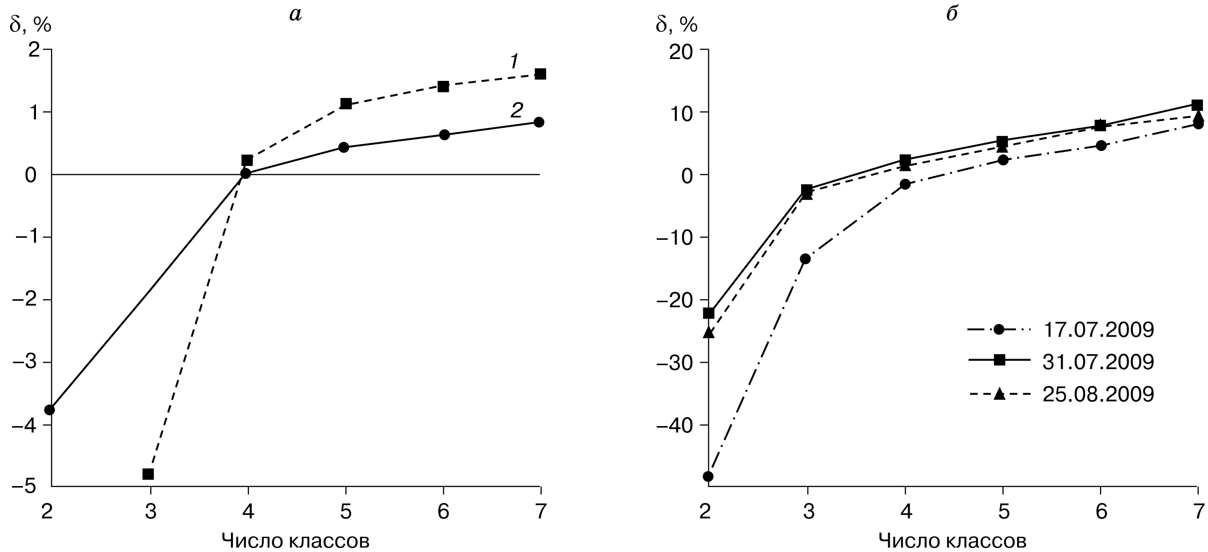

Рис. 2. Зависимость относительной погрешности измерения площади водоемов (δ) от числа классов:

а – по снимку спутника GeoEye-1; *б* – по снимку спутника Landsat 5; *1* – оз. Сюртяв-Малто; *2* – все водоемы.

изменения спектральных характеристик, связанных с этими факторами. Результаты использования алгоритмов неконтролируемой классификации IsoDate и K-Means оказались более точными и практически идентичными.

Как отмечалось выше, для классификации водоемов в основном используются спектральные каналы ближней ИК-зоны. Сравнение результатов классификации с использованием всех четырех спектральных каналов спутника GeoEye-1 и только одного канала ближней ИК-зоны (0,76–0,90 мкм) показало достаточно близкую их сходимость, однако в данном случае при использовании одного канала ближней ИК-зоны погрешность оказалась выше при любом числе классов. Зависимость погрешности измерения суммарной по району ПВ и отдельно площади оз. Сюртяв-Малто от числа классов представлены на рис. 2, *а*. Видно, что минимальные погрешности могут быть достигнуты при делении территории на четыре класса. В итоге для картирования водоемов по многозональным данным спутника GeoEye-1 классификация проводилась по алгоритму IsoDate с делением на четыре класса и с использованием четырех спектральных каналов спутника.

На рис. 3, *а* приведено общее распределение относительной погрешности измерения площади (δ) отдельных водоемов, классифицированных по

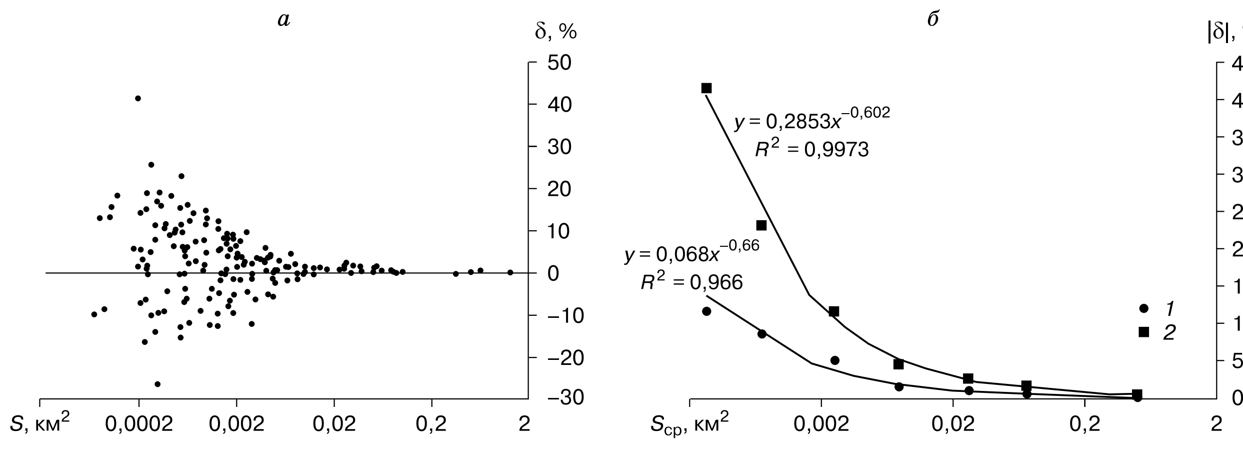

Рис. 3. Зависимость относительной погрешности измерения площади отдельных водоемов δ от их площади S (*а*) и уравнения зависимости модуля относительной средней $|\delta_{ср}|$ (*1*) и максимальной $|\delta_{макс}|$ (*2*) погрешностей от средних значений площади водоемов $S_{ср}$ в группах (*б*) (по многозональному снимку спутника GeoEye-1).

Таблица 1. **Исходные параметры интервальных групп водоемов и значения относительных погрешностей измерения площади водоемов по данным спутника GeoEye-1**

Номер группы	S, км^2	n	$S_{ср}$, км^2	$\|\delta_{ср}\|$, %	$\|\delta_{макс}\|$, %	СКО $\|\delta\|$, %
1	0,0001–0,0005	41	0,0003	11,69	41,36	7,80
2	0,0005–0,001	30	0,0007	8,53	23,17	5,65
3	0,001–0,005	61	0,0025	4,96	11,64	3,39
4	0,005–0,01	12	0,0076	1,49	4,60	1,28
5	0,01–0,05	14	0,0263	0,99	2,43	0,71
6	0,05–0,1	8	0,0706	0,55	1,45	0,50
7	0,1–1,0	3	0,4906	0,16	0,46	0,25

Примечание. n – число водоемов в группе.

многозональным данным спутника GeoEye-1. Близкое к симметричному относительно нулевого значения распределение δ свидетельствует об оптимальном выборе спектральных каналов и алгоритма классификации.

Для определения эмпирических уравнений зависимости погрешности измерения ПВ от размеров их площади все водоемы были разделены на семь групп, объединяющих водоемы заданного интервала площадей. Самое большое оз. Сюртяв-Малто (см. рис. 1) в группу не включено, а погрешность измерения его площади использована для тестирования (валидации) результатов, полученных по регрессионной зависимости.

В табл. 1 приведены основные исходные параметры интервальных групп водоемов, расчетные величины среднеквадратического отклонения (СКО) погрешности, а также значения средней $|\delta_{ср}|$ и максимальной $|\delta_{макс}|$ относительной погрешности. Средняя ПВ в группах определялась по эталонным водоемам, выделенным по изображению в панхроматическом канале спутника GeoEye-1.

На рис. 3, *б* приведены эмпирические уравнения зависимости $|\delta_{ср}|$ и $|\delta_{макс}|$ от средней площади водоемов ($S_{ср}$) по группам. Погрешность измерения тестируемой площади оз. Сюртяв-Малто, по данным многозональной съемки со спутника GeoEye-1, составила 0,04 %, а по эмпирическим уравнениям для этой площади (1,24 км^2) значения $|\delta_{ср}|$ и $|\delta_{макс}|$ составляют 0,059 и 0,25 % соответственно. Расчетные значения погрешности оказались выше измеренного, что, возможно, связано с относительно округлой формой оз. Сюртяв-Малто и отсутствием изрезанной береговой кромки, в то время как в группы попали водоемы различной формы, в том числе с неровной береговой линией. В данном случае $|\delta_{ср}|$ характеризует точность измерения ПВ наиболее часто встречающейся формы, а $|\delta_{макс}|$ в большей степени относится к водоемам с аномально неровной береговой линией. В целом измеренная и расчетная величины $|\delta_{ср}|$ по оз. Сюртяв-Малто имеют одинаковый порядок, что свидетельствует о возможности использования полученного уравнения для определения средней погрешности измерения площади водоемов, выделенных путем автоматизированной классификации многозонального КС спутника GeoEye-1.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОЩАДИ ВОДОЕМОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА LANDSAT 5

Для исследования погрешностей измерения ПВ по данным спутника Landsat 5 были взяты три КС от 17.07.2009, 31.07.2009 и 25.08.2009 г. В работе использовались данные 4, 5 и 7 спектральных каналов ближней (0,76–0,90 мкм) и средней (1,55–1,75, 2,08–2,35 мкм) ИК-зоны с пространственным разрешением 30 м, классификация проводилась по алгоритму IsoData. Как отмечалось выше, для получения достоверных оценок погрешностей необходимо, чтобы даты КС, используемых в качестве эталонов, и анализируемых КС были максимально близки. Поскольку снимок со спутника GeoEye-1 был сделан 22.07.2009 г., съемка со спутника Landsat 5 от 17.07.2009 г. наиболее близка по дате. Однако из-за паводков в первой половине лета ПВ в этих районах меняется наиболее интенсивно [*Баранов и др., 2012*], что служит аргументом в пользу выбора даты 31.07.2009 г. Из 170 эталонных водоемов для оценки оставлен 61 с общей площадью 3,77 км^2, минимальной площадью отдельных водоемов 1270 м^2 и максимальной – 1,24 км^2 (оз. Сюртяв-Малто).

На рис. 2, *б* представлена зависимость погрешности измерения суммарной ПВ от числа классов при классификации многозональных снимков со спутника Landsat 5 разных дат съемки. Видно, что в данном случае δ имеет минимальные значения при разделении на четыре класса. Погрешности измерений ПВ по снимкам 31.07.2009 г. и 25.08.2009 г. мало различаются, что свидетельствует о стабилизации ПВ к концу июля. В итоге для оценки погрешности измерения ПВ по данным спутника Landsat 5 был выбран снимок 31.07.2009 г.

На рис. 4, *а* приведено общее распределение δ измерения площади отдельных водоемов, классифицированных по данным спутника Landsat 5 (31.07.2009 г.). В распределении отмечается преобладание положительных значений δ, что свидетельствует о занижении суммарной ПВ (Landsat 5) по отношению к эталонным водоемам (GeoEye-1) и может быть связано с неполным совпадением дат съемки с этих спутников. В то же время уменьшение числа классов приводит к более существенному завышению суммарной ПВ и в целом к увеличению погрешности (см. рис. 2, *б*). Как и в предыдущем примере, для определения уравнений зависимости $|\delta_{ср}|$ и $|\delta_{макс}|$ от ПВ все во-

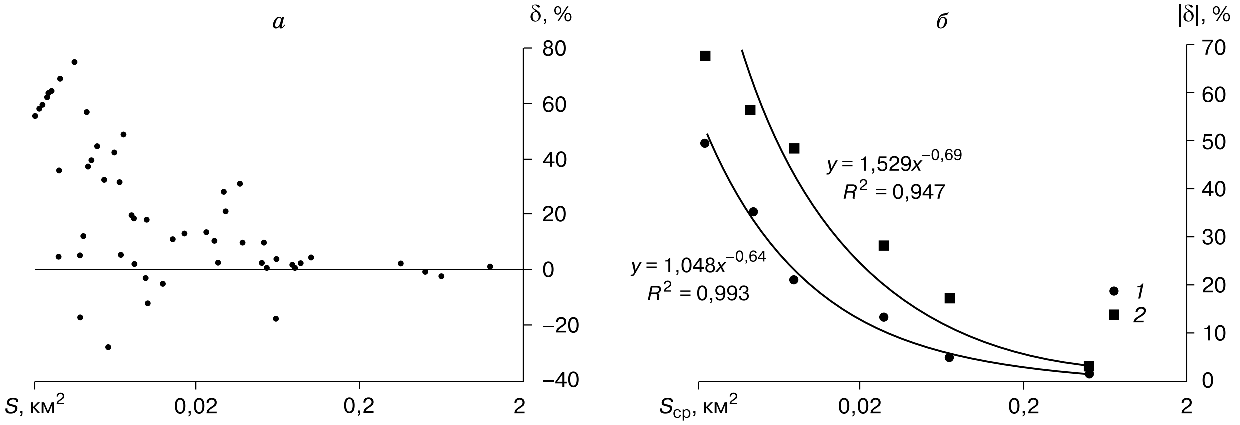

Рис. 4. Зависимость относительной погрешности измерения площади отдельных водоемов δ от их площади S (*а*) и уравнения зависимости модуля относительной средней $|\delta_{ср}|$ (*1*) и максимальной $|\delta_{макс}|$ (*2*) погрешностей от средних значений площади водоемов $S_{ср}$ в группах (*б*) (по многозональному снимку спутника Landsat 5).

доемы были разделены на шесть групп, объединяющих водоемы заданного интервала площадей (табл. 2).

Результаты оценки погрешности по данным спутника Landsat 5 приведены в виде эмпирических уравнений зависимости $|\delta_{ср}|$ и $|\delta_{макс}|$ от средней ПВ ($S_{ср}$) по группам (см. рис. 4, *б*). Погрешность измерения тестовой площади оз. Сюртяв-Малто, по данным спутника Landsat 5, составила 0,91 %. Согласно выведенным уравнениям, для водоемов с такой площадью $|\delta_{ср}|$ и $|\delta_{макс}|$ составляют 0,91 и 1,31 % соответственно. В данном случае расчетное среднее значение погрешности оказалось равным измеренному, что свидетельствует о возможности использования полученных уравнений для определения погрешности измерения ПВ по данным спутника Landsat 5 в соответствии с проведенной классификацией.

На основе полученных уравнений (см. рис. 3, *б*; 4, *б*) определены количественные показатели, характеризующие связь $|\delta_{ср}|$ и $|\delta_{макс}|$ с площадью водоемов и пространственным разрешением используемой съемочной системы. В левом столбце табл. 3 приведены заданные значения $|\delta_{ср}|$ и $|\delta_{макс}|$, а также отношения ПВ к площади участка земной поверхности, соответствующего пикселу КС: S_G для спутника GeoEye-1 и S_L для спутника Landsat 5. Из табл. 3 следует, что, например, для определения ПВ по многозональным данным GeoEye-1 с $|\delta_{макс}| < 1$ % площадь оцениваемого водоема должна быть в $3{,}07 \cdot 10^4$ раза больше, чем S_G. При использовании КС спутника Landsat 5 аналогичное отношение площадей составляет $2{,}64 \cdot 10^3$. На практике это означает, что для измерений с погрешностью менее 1 % ПВ должна быть не менее чем на 4–5 порядков больше площади участка земной поверхности, соответствующего пикселу КС.

Проведено сопоставление отношений средних значений погрешностей $|\delta_{ср.L}|$ и $|\delta_{ср.G}|$ измерения

Таблица 2. **Исходные параметры интервальных групп водоемов и значения относительных погрешностей измерения площади водоемов по данным спутника Landsat 5**

Номер группы	S, км^2	n	$S_{ср}$, км^2	$\lvert\delta_{ср}\rvert$, %	$\lvert\delta_{макс}\rvert$, %	СКО $\lvert\delta\rvert$, %
1	0,001–0,003	17	0,0022	49,86	68,47	18,58
2	0,003–0,005	10	0,0042	35,52	57,07	20,92
3	0,005–0,01	11	0,0077	21,31	48,85	15,82
4	0,01–0,05	11	0,0273	13,5	28,18	9,55
5	0,05–0,1	8	0,0706	5,15	17,43	5,77
6	0,1–1,0	3	0,4905	1,61	2,16	0,87

Таблица 3. **Связь погрешности измерения площади водоема с его размерами и пространственным разрешением КС спутников GeoEye-1 и Landsat 5**

$\lvert\delta_{ср}\rvert$, %	Отношение ПВ к площади участка земной поверхности, соответствующего пикселу КС	
	GeoEye-1 (S_G = 4 м^2)	Landsat 5 (S_L = 900 м^2)
10,0	$1{,}20 \cdot 10^2$	$0{,}33 \cdot 10^2$
1,0	$5{,}75 \cdot 10^3$	$1{,}15 \cdot 10^3$
0,1	$2{,}75 \cdot 10^5$	$4{,}00 \cdot 10^4$
$\lvert\delta_{макс}\rvert$, %		
10,0	$6{,}87 \cdot 10^2$	$0{,}86 \cdot 10^2$
1,0	$3{,}07 \cdot 10^4$	$2{,}64 \cdot 10^3$
0,1	$1{,}37 \cdot 10^6$	$8{,}17 \cdot 10^4$

Таблица 4. **Отношение погрешностей измерения площади водоемов по снимкам спутников Landsat 5 и GeoEye-1**

S, км^2	$\|\delta_{ср.L}\|$, %	$\|\delta_{ср.G}\|$, %	$\|\delta_{ср.L}\|/\|\delta_{ср.G}\|$
10,0	0,24	0,0148	16,21
1,0	1,05	0,0680	15,41
0,1	4,57	0,3100	14,74

Примечание. Средняя относительная погрешность: $|\delta_{ср.L}|$ – по снимкам Landsat 5; $|\delta_{ср.G}|$ – по снимкам GeoEye-1.

ПВ по КС спутников Landsat 5 и GeoEye-1 с отношением пространственного разрешения КС этих спутников. В табл. 4 приведены заданные ПВ (S), значения рассчитанных средних погрешностей $|\delta_{ср.L}|$ и $|\delta_{ср.G}|$ измерения ПВ по КС спутников GeoEye-1 и Landsat 5, а также отношения средних значений погрешностей $|\delta_{ср.L}|/|\delta_{ср.G}|$. Как видно из табл. 4, отношения погрешностей $|\delta_{ср.L}|/|\delta_{ср.G}|$ достаточно близки к величине $\sqrt{S_L/S_G} = 15$ при разных значениях ПВ. Другими словами, отношение погрешностей близко к отношению длин сторон участков земной поверхности, соответствующих пикселу КС. Отсюда следует, что отношение параметров, характеризующих пространственное разрешение КС, может служить критерием корректности эмпирических уравнений зависимости погрешности от ПВ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в настоящей работе результаты могут быть сопоставлены с опубликованными данными, характеризующими величину погрешности измерения ПВ по многозональным КС со спутников Landsat 5 и радиолокационным КС со спутника ALOS (PALSAR). На основе опубликованных в [*Брыксина, Полищук, 2013*] и [*Chirico, Malpeli, 2012*] данных были определены средние относительные погрешности для водоемов с площадями 10,0; 1,0 и 0,1 км^2 (табл. 5). Значения погрешностей измерения ПВ по многозональным КС спутника Landsat 5, полученные в настоящей работе (Марре-Сале) и представленные в [*Брыксина, Полищук, 2013*] достаточно близки при значениях ПВ, равных 1,0 км^2, и незначительно расходятся при 10,0 и 0,1 км^2. Расхождения в данном случае могут быть связаны с месячной разницей в датах пар КС спутника Landsat 5 (17.07.2006, 21.07.2008 г.) и используемых для формирования эталонных водоемов КС спутника QuickBird (15.08.2006, 02.09.2008 г.) [*Брыксина, Полищук, 2013*]. Кроме того, в этой работе не приведены сведения о методике обработки КС со спутника Landsat 5, что затрудняет сравнение результатов и характеристику факторов, влияющих на величину погрешности. Тем не менее достаточно близкая сходимость результатов в целом свидетельствует о возможности использования полученных эмпирических уравнений для расчета средней погрешности при измерении площади отдельных водоемов с использованием многозональных КС спутников серии Landsat.

По радиолокационным снимкам спутника ALOS (PALSAR), погрешности существенно выше для всех значений ПВ, несмотря на то, что в эксперименте [*Chirico, Malpeli, 2012*] пространственное разрешение радиолокационных КС составляло 12,7 м, т. е. почти в 3 раза выше, чем у КС спутника Landsat 5. В данном случае более высокая погрешность также может быть связана с разницей в датах съемки со спутника ALOS (12.06.2010 г.) и GeoEye-1 (11.07.2009 г.), многозональный КС которого использовался для формирования эталонных водоемов. Теоретически, другой причиной может быть более сильная извилистость берегов внутренних водоемов на Багамских островах в сравнении с преобладающими округлыми формами термокарстовых озер Западной Сибири. В то же время выше отмечено, что водоемы с аномальной извилистостью береговой линии характеризуются максимальными погрешностями $|\delta_{макс}|$, согласно полученному уравнению (см. рис. 4, *б*), не превышающими 1,6 % для водоемов с площадью 1 км^2. По данным спутника ALOS (PALSAR), для водоемов этой площади погрешность составляет 4,45 % (см. табл. 5), т. е. почти в 3 раза больше, чем для КС спутника Landsat 5. Скорее всего, большие значения погрешности при более высоком пространственном разрешении исходных данных спутника ALOS (PALSAR) обусловлены съемкой под углом к местной нормали при формировании радиолокационных КС.

Очевидно, что в любых исследованиях, касающихся количественной оценки ПВ по данным дистанционного зондирования Земли, необходимо приводить подробные сведения об алгоритмах

Таблица 5. **Сравнение средних значений погрешностей измерения площади водоемов по снимкам спутников Landsat 5 и ALOS (PALSAR)**

S, км^2	$\|\delta_{ср}\|$, %		
	Landsat 5* (Марре-Сале)	Landsat 5**	ALOS (PALSAR)***
10,0	0,24	0,55	2,33
1,0	1,05	1,40	4,45
0,1	4,57	3,53	8,48

* По данным автора.
** По: [*Брыксина, Полищук, 2013*].
*** По: [*Chirico, Malpeli, 2012*].

обработки исходных данных, величине погрешностей и методе их оценки. В настоящей работе показано, что при выделении водоемов по многозональным КС оптического диапазона погрешность измерения ПВ существенно зависит от числа классов. Отсюда следует, что для минимизации погрешности измерения ПВ необходимо обосновывать число классов и применяемые алгоритмы классификации. Полученные уравнения зависимости погрешности измерения ПВ от их размеров и пространственного разрешения КС позволяют характеризовать погрешность как порог значимых изменений ПВ, фиксируемых по разновременным КС и используемых в качестве индикаторов изучаемых природных и антропогенных процессов в криолитозоне.

ВЫВОДЫ

1. На примере водоемов западного побережья полуострова Ямал (район Марре-Сале) показано, что погрешность измерения ПВ зависит от числа классов при классификации многозональных КС спутников GeoEye-1 и Landsat 5 и минимальна при использовании алгоритмов неконтролируемой классификации с делением на четыре класса типов поверхности.

2. Установлены эмпирические уравнения зависимости средней и максимальной относительной погрешности измерения ПВ от размеров водоемов, выделяемых по КС с различным пространственным разрешением.

3. Установлена связь погрешности измерения ПВ с параметром, характеризующим отношение ПВ к пространственному разрешению используемых КС. В частности, при использовании КС спутников Landsat 5 и GeoEye-1 для измерения ПВ с максимальной погрешностью 1 % площадь водоема должна на 4–5 порядков превышать площадь участка земной поверхности, соответствующей пикселу снимка.

4. Показано, что отношение параметров, характеризующих пространственное разрешение КС, может служить критерием корректности эмпирических уравнений зависимости погрешности от ПВ. Это следует из того, что отношение погрешностей измерения площади одного и того же водоема по КС разного пространственного разрешения должно быть максимально близко к отношению длин сторон участков земной поверхности, соответствующих пикселам КС с разным пространственным разрешением.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 27, проект 2.3.2. “Разработка аэрокосмических методов мониторинга природно-техногенных комплексов в районах интенсивного освоения нефтегазовых месторождений Арктики и субарктики”.

Литература

Баранов Ю.Б., Киселевская К.И., Кожина Л.Ю. Опыт использования радиолокационных космических съемок при гидрологических исследованиях // Геоматика, 2012, № 4, с. 76–81.

Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Анализ сезонных изменений площадей термокарстовых озер в зоне вечной мерзлоты Западной Сибири с использованием снимков ERS-2 // Исслед. Земли из космоса, 2009, № 3, с. 90–93.

Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Исследование точности дистанционного измерения площадей озер с использованием космических снимков // Геоинформатика, 2013, № 1, с. 64–68.

Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исслед. Земли из космоса, 2009, № 4, с. 88–96.

Елсаков В.В., Марущак И.О. Межгодовые изменения термокарстовых озер северо-востока европейской части России // Исслед. Земли из космоса, 2011, № 5, с. 45–57.

Кондратьев К.Я., Шумаков Ф.Т. Физические основы космического мониторинга водоемов в видимой и ближней ИК-зонах спектра // Исслед. Земли из космоса, 1990, № 6, с. 44–48.

Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 16–26.

Кравцова В.И., Тарасенко Т.В. Динамика термокарстовых озер Центральной Якутии при изменениях климата с 1950 года // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 3, с. 31–42.

Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири / Л.Н. Крицук. М., Науч. мир, 2010, 352 с.

Chen M., Rowland J.C., Wilson C.J. et al. The importance of natural variability in Lake Areas on the detection of permafrost degradation: A case study in the Yukon Flats, Alaska // Permafrost and Periglacial Processes, 2013, vol. 24, No. 3, p. 224–240.

Chirico P.G., Malpeli K.C. Inland and coastal hydrographic feature identification in the Bahamas using RADAR data and raster processing in a GIS // J. Geography and Geol., 2012, vol. 4, No. 3, p. 29–42.

Frohn R.C., Hinkel K.M., Eisner W.R. Satellite remote sensing classification of thaw lakes and drained thaw lake basins on the North Slope of Alaska // Remote Sensing of Environ., 2005, vol. 97, No. 1, p. 116–126.

Поступила в редакцию
23 января 2014 г.