



дробления образца по формуле  $k = \frac{\sigma_{\max}^2}{2E}$ , где  $\sigma_{\max}$

– максимальное напряжение в образце;  $E$  – модуль упругости материала образца.

Критерием проверки используемого в данной работе теоретического подхода является сравнение среднего диаметра на выходе, полученного экспериментальным путем  $d_{cp}$  (см. табл. 1, колонка 6), со средним диаметром на выходе, полученным теоретически (табл. 2, колонка 6). Значения среднего диаметра на выходе, полученные теоретически, согласуются со значениями, полученными экспериментальным путем [5]. Таким образом, в зависимости от величины работы внешних сил и потенциальной энергии деформирования кусков породы на основе эмпирической

формулы Бонда вычисляется средний диаметр на выходе, который позволяет получить теоретически гранулометрическую характеристику процесса дробления породы.

Установлено, что исследование гранулометрической характеристики разрушенного образца горной породы в зависимости от величины работы внешних сил и, соответственно, от потенциальной энергии деформирования объемов породы, проводимое на основе эмпирической формулы Бонда, с высокой точностью согласуется с экспериментальными данными, представленными в работе Э.А. Хопунова, где показаны параметры реального разрушения образцов при различном уровне энергетических затрат.

*Статья поступила 10.10.2014 г.*

#### Библиографический список

1. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с.
2. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов / пер. с англ. М.: Мир, 1981. 304 с.
3. Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л., Попков В.Г., Уманский Э.С. Сопrotивление материалов. Киев: Высшая школа, 1973.
4. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. М.: Недра, 1982. 366 с.
5. Хопунов Э.А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья: монография. Екатеринбург: ООО «УИПЦ». 2013. 429 с.

УДК 528.852.8: 556.5

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ СЕВЕРА оз. БАЙКАЛ

© Б.З. Цыдыпов<sup>1</sup>, Е.Ж. Гармаев<sup>2</sup>, А.А. Аюржанаев<sup>3</sup>, С.Г. Андреев<sup>4</sup>, Э.А. Батоцыренов<sup>5</sup>, Ж.Б. Алымбаева<sup>6</sup>

Байкальский институт природопользования СО РАН,

670047, Россия, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8.

Проведены исследования изменения состояния береговой линии островов Ярки (Северный Байкал) на основе обработки данных дистанционного зондирования Земли. Созданы векторные слои берегов в результате проведения автоматизированной классификации разновременных снимков Landsat. Наблюдается планомерное уменьшение площади песчаной косы Ярки. Резкие суточные колебания уровня воды в результате сгонно-

<sup>1</sup>Цыдыпов Баир Зугдырович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэкологии, тел.: 89024585468, e-mail: bz61@mail.ru

Tsydyпов Bair, Candidate of technical sciences, Senior Researcher of the Geocology Laboratory, tel.: 89024585468, e-mail: bz61@mail.ru

<sup>2</sup>Гармаев Ендон Жамьянович, доктор географических наук, зав. лабораторией геоэкологии, и.о. директора, тел.: 89025641519, e-mail: garend1@yandex.ru

Garmaev Endon, Doctor of Geography, Head of the Geocology Laboratory, Acting Director, tel.: 89025641519, e-mail: garend1@yandex.ru

<sup>3</sup>Аюржанаев Александр Андреевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории геоэкологии, тел.: 89146393699, e-mail: aaa@binm.bscnet.ru

Ayurzhanaev Alexander, Candidate of technical sciences, Researcher of the Geocology Laboratory, tel.: 89146393699, e-mail: aaa@binm.bscnet.ru

<sup>4</sup>Андреев Сергей Геннадьевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэкологии, тел.: 89021692877, e-mail: baikal.andreev@gmail.com

Andreev Sergei, Candidate of Geography, Senior Researcher of the Geocology Laboratory, tel.: 89021692877, e-mail: baikal.andreev@gmail.com

<sup>5</sup>Батоцыренов Эдуард Аюрович, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геоинформационных систем, тел.: 89024585280, e-mail: edikbat@gmail.com

Batotsyrenov Eduard, Candidate of Geography, Researcher of the Geoinformation Systems Laboratory, tel.: 89024585280, e-mail: edikbat@gmail.com

<sup>6</sup>Алымбаева Жаргалма Баторовна, кандидат биологических наук, ведущий инженер лаборатории геоэкологии, тел.: 89516308438, e-mail: ajargalma2@gmail.com

Alymbaeva Zhargalma, Candidate of Biology, Leading Researcher of the Geocology Laboratory, tel.: 89516308438, e-mail: ajargalma2@gmail.com



нагонных и сейшевых колебаний достигают отметок до 20–30 см. Разница синхронных наблюдений в разных пунктах наблюдений достигает 19 см. Предлагается увеличение количества гидропостов на восточном берегу оз. Байкал.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр. 9 назв.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование; мультиспектральный снимок; дешифрирование; автоматизированная классификация; векторный слой; береговая линия; уровень воды; гидропост.

#### SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF THE LAKE BAIKAL NORTHERN COASTLINE

**B.Z. Tsydypov, E.Zh. Garmaev, A.A. Ayurzhanayev, S.G. Andreev, E.A. Batotsyrenov, Zh.B. Alymbaeva**

Baikal Institute of Nature Management SB RAS,  
8 Sakhyanova St., Ulan-Ude, Buryat Republic, 670047, Russia.

The article studies the changes in the coastal line of Yarki Island (Northern Baikal) on the basis of remote sensing data interpretation. The automated classification of Landsat multitemporal imagery resulted in the creation of vector layers of the shores. Observations show systematic reduction of the area of Yarki sand spit. Sharp daily fluctuations of the water level caused by surge and seiche oscillations reach up to 20-30 cm. The difference of simultaneous monitoring at different observation points reaches 19 cm. The paper proposes to increase the number of gauging stations on the eastern shore of the Lake Baikal.

4 figures. 1 table. 9 sources.

*Key words:* remote sensing; multispectral image; interpretation; automated classification; vector layer; coastline; water level; gauging station.

Главным техногенным фактором вмешательства в естественное состояние природной среды оз. Байкал явилось строительство в 1957–1959 гг. на р. Ангаре Иркутского гидроузла, в результате которого средний уровень оз. Байкал был повышен на 1,2 м по отношению к естественному состоянию – 455,61 м в 1957 г. (здесь и далее используется Тихоокеанская система высот), что привело к формированию нового гидрологического режима озера [3]. В настоящее время уровень озера Байкала в большей степени зависит не от природных факторов, а от гидроэнергетических параметров деятельности каскада ангарских ГЭС [7]. Следует отметить, что внутригодовые изменения уровня озера в его естественном режиме составляли 82 см, а после зарегулирования – уже 94 см [1]. Подъем уровня озера отрицательно повлиял на продуктивность водной фауны и флоры, биоразнообразие околоводных птиц и животных, а также привел к разрушению береговой линии. Конечным результатом строительства Иркутской ГЭС стало превращение оз. Байкал в искусственное водохранилище со всеми вытекающими отсюда последствиями.

В период многоводных лет середины 90-х гг. прошлого столетия наблюдались отметки, значительно превышающие уровень 457,0 м. Это, естественно, привело к целому ряду геоэкологических осложнений: произошло массовое разрушение береговой линии низменного восточного побережья (прибрежных лесов, зон отдыха, размыв пляжей и береговых сооружений), подтопление и затопление сельскохозяйственных угодий и населенных пунктов. Был нанесен экологический ущерб всему природно-биологическому комплексу озерной системы. Также значительный ущерб нанесен экономике Бурятии [4]. Правительство Республики Бурятия по согласованию с Администрацией Иркутской области инициировало принятие в 2001 г. Постановления Правительства РФ № 234 «О пределах значений уровня воды в оз. Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности». Данный подзаконный акт Федерального закона «Об

охране оз. Байкал» регламентирует внутригодовое колебание уровня озера в пределах от 456,0 до 457,0 м и минимизирует отрицательные эколого-экономические последствия в береговой полосе озера.

#### *Изменение береговой линии архипелага Ярки*

Необходимо особо рассматривать реальную угрозу полного разрушения островов Ярки, отделяющих открытый Байкал от Верхнеангарского мелководья. Ярки – узкая песчаная островная система длиной до 17 км и шириной до 200 м. Песчаная коса острова находится неподалеку от пос. Нижнеангарск, материк от островов отделяют устья рек Кичера и Верхняя Ангара. При приближении уровня озера к отметке 457,0 м и соответствующей волновой деятельности в течение 3–5 суток группа островов Ярки просто исчезнет, а холодные байкальские воды уничтожат всю уникальную экосистему мелководий в дельтах Верхней Ангары и Кичеры, в том числе верхнеангарскую расу омуля. При этом длина оз. Байкал увеличится на 40–50 км к северу. Одновременно изменятся все параметры водной чаши озера и, соответственно, его уровеньный режим.

Визуальный осмотр островов показал, что они продолжают разрушаться, причем берега размывы преимущественно со стороны озера. Основной причиной размыва Ярков является подъем уровня и волновые воздействия. Амплитуда колебаний уровня озера при его подъеме на 1 м и зарегулированном стоке в многолетнем разрезе увеличилась. Это привело к активизации абразионных процессов [5]. Отметим, что катастрофическая активизация береговых процессов, наблюдаемая в настоящее время, спровоцирована именно техногенными причинами – подпором воды от гидроузла. Активное уничтожение отдыхающими растительности на Ярках усилило процесс развешивания дюн и выполаживания островов [2].

На основе обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) проведены исследования изменения состояния береговой линии архипелага Ярки.



Регулярная космическая съемка предоставляет объективный, оперативно получаемый материал о состоянии земной поверхности и ее изменениях, а современные ГИС-технологии обработки космоснимков обеспечивают точное по координатное совмещение разновременных материалов для изучения динамики изменений, происходящих на поверхности Земли. Для оптимального дешифрирования и автоматического получения границ береговой линии выбран алгоритм автоматизированной классификации космического снимка. Последовательность работ по обработке спутниковых изображений следующая:

- 1) загрузка ортотрансформированных изображений Landsat из Интернета;
- 2) преобразование снимков – синтез RGB-композиций, по координатное выделение нужного фрагмента;
- 3) дешифрирование объектов (тематическая классификация с последующей генерализацией);
- 4) создание векторных слоев, их редактирование;
- 5) получение итоговой карты изменения берегов.

Обработка снимков проведена при помощи программного обеспечения ENVI 4.7 + ENVI EX ([www.itvis.com/ENVI](http://www.itvis.com/ENVI)), которое включает наиболее полный набор функций для обработки данных ДЗЗ и их интеграции с ГИС. Созданные в ПО ENVI векторные слои впоследствии были обработаны в ГИС ArcView 3.2.

Картографирование островной системы Ярки выполнено по материалам разновременной мультиспектральной съемки. С геопортала Геологической службы США с помощью поисковой системы GloVis (<http://glovis.usgs.gov>) загружены три «летние» сцены платформы Landsat на территорию Ярков (path = 131, row = 21) от 03.07.1994, 12.08.2000 и 29.08.2009, так как летний период характеризуется стабильностью, продолжительностью и наилучшими условиями освещения. Пространственное разрешение снимков равно 15–30 м/пиксел. Обязательным условием при загрузке снимков являлось полное отсутствие облачности (0%), высокое качество (Qlty=9) и достаточный уровень подготовки снимков (уровень L1T – ортотрансформирование, радиометрическая и атмосферная коррекция). Использование данных, находящихся в свободном доступе, обуславливает достаточно легкое продолжение временной серии динамики природных и антропогенных объектов в последующие годы.

В связи с особенностями прохождения спутников Landsat не удалось загрузить сцены за один и тот же период времени. Если же и есть сцены, близкие по дате, то мешают еще два фактора: облачность и плохое качество снимка, но все же постарались подобрать сцены, близкие по дате.

Одно из основных направлений использования многозональных снимков – синтез цветных изображений для визуального дешифрирования и последующей автоматизированной классификации. Известно, что разделение объектов и их оконтуривание целесообразно выполнять по снимкам с преднамеренно ложной цветопередачей. Для этого применен синтез с

окрашиванием изображения, полученного в ближней инфракрасной зоне спектра, красным цветом, в первой средней инфракрасной – зеленым, а в красной видимой зоне – синим, то есть созданы псевдоцветные RGB-композиции с комбинацией каналов 4:5:3. Эта комбинация позволяет четко различить границу между водой и сушей и подчеркнуть скрытые детали, плохо видимые при использовании только каналов видимого диапазона. Из полученных RGB-композиций вырезаны одинаковые фрагменты размерами 21,5×11,7 км, в которые полностью входит архипелаг Ярки.

Для выделения береговой линии использовалась контролируемая (иначе – с обучением) классификация методом прямоугольников. Данный метод применяют в случаях, когда значения спектральной яркости разных объектов практически не перекрываются между собой, а классов объектов немного. В качестве обучающих выборок были заданы два типа эталонных участков: водная поверхность и суша. Для каждого типа эталонов подсчитывались среднее значение яркости пиксела и стандартное отклонение яркости. Максимальное стандартное отклонение от среднего значения яркости класса «вода» не превышало значения 2, что связано с достаточно однородными характеристиками этого класса объектов. Недостатком выделения является частичное перекрытие яркостных характеристик песчаных отмелей с сушей, но при дальнейшей обработке эти наложения были удалены [9].

Также для отделения суши от водной поверхности использован алгоритм неконтролируемой классификации методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique – итерационная самоорганизующая методика анализа данных). Данный алгоритм целесообразно применять при отсутствии априорной информации об объекте съемки. Метод позволяет выделять контуры с неконтрастной по спектральной яркости структурой. Были выбраны оптимальные, на наш взгляд, параметры: количество классов – 2, максимальное число итераций – 20, порог сходимости (количество пикселов, которые меняют свою принадлежность к классу при переходе к следующей итерации) – 5%, максимальное стандартное отклонение от среднего – 13, минимальное число пикселов для выделения класса – 3, максимальное стандартное отклонение внутри класса – 5, минимальное спектральное расстояние – 5 пикселов.

Ареалы суши на изображениях, полученных в результате неконтролируемой и контролируемой классификации, оказались идентичными. Это связано с тем, что суша на снимках достаточно однородна по спектральной яркости, а граница воды и суши четко обнаруживается благодаря отражательным свойствам водной поверхности в используемой комбинации каналов Landsat.

После проведения постклассификации методом анализа большинства полученные растровые изображения были переведены в векторную форму. Далее дешифрированные контуры водных участков и суши были отредактированы с целью получения только век-



торных слоев песчаной косы. В итоге получены три разновременных векторных слоя – за 1994, 2000 и 2009 гг. Налицо планомерное уменьшение площади песчаной косы Ярки в 2009 г. в сравнении с 2000 г. (на 0,2 км<sup>2</sup>) и 1994 г. (на 0,7 км<sup>2</sup>) (таблица, рис. 1, 2).

Полученные результаты являются предварительными. Основываясь только на анализе данных ДЗЗ, сложно говорить о каком-либо закономерном отступлении берегов в течение гидрологического года. Количественно оценить темпы современных процессов отступления берегов достаточно проблематично. Тем более, заполнение и сработка оз. Байкал не происходят строго в единые сроки, это зависит от водности конкретного года, сроков наполнения водоема, условий сброса воды через шлюзы Иркутской плотины и др. Для точного установления темпов размыва берегов (в м/год) и осуществления прогноза развития ситуации необходимы дальнейшие мониторинговые

работы.

**Ветро-волновые условия**

Волновая деятельность на всем протяжении берега от пос. Нижнеангарска до губы Дагары, где проходит устьевая часть Верхней Ангары, уже не способствует поступлению с паводками влекомых и взвешенных песчаных фракций. Следовательно, объем поступившего наносного материала не может компенсировать происходящие размывы островов Ярки и тем более реконструировать их до прежнего состояния, существовавшего до повышения уровня озера до подпорной отметки Иркутского гидроузла [8]. По расчетам О.Л. Рыбака, выполнившего в этом районе литодинамические исследования, среднегоголетняя скорость размыва островов составляет 0,8–1,0 м/год. Следовательно, полное уничтожение Ярков может произойти в ближайшие 30–40 лет [6].

**Площади векторных слоев береговой линии островной гряды Ярки**

Название	Год	Площадь, км <sup>2</sup>
1994-4-5-3_isle.shp	1994	2,524
2000-4-5-3_isle.shp	2000	2,052
2009-4-5-3_isle.shp	2009	1,855



**Рис. 1. Изменение островной гряды Ярки в сравнении векторных слоев 1994 и 2009 гг.**



**Рис. 2. Изменение островной гряды Ярки в сравнении векторных слоев 2000 и 2009 гг.**



В результате волновой деятельности оказались размыты многие островки Ярков. Сгонно-нагонные явления, связанные с особенностями пространственных контуров озера и ветровым режимом, заведомо предполагают, что при южных ветрах уровень озера в осенний штормовой период в северной части водоема значительно превышает допустимые отметки, указанные в правительственном постановлении. Именно этим обстоятельством объясняется интенсивный размыв островной системы Ярки – наблюдаются значительные видоизменения песчаных островов, пересыпей, береговых валов и кос. Более того, даже при существующем уровне режиме разрушение Ярков в ближайшем будущем может вызвать экспансию холодных байкальских вод далеко на север с катастрофическими последствиями для биоты устьев рек Кичера и Верхняя Ангара.

Характерными для оз. Байкал являются сгонно-нагонные и сейшевые колебания, которые неодинаковы в разных частях озера, зависят от силы, направления и продолжительности ветра. Сгонно-нагонные колебания достигают наибольшей интенсивности осенью в период наиболее значительной штормовой активности. Сейшевые колебания уровня воды наблюдаются почти ежедневно (в ряде случаев резкие суточные колебания достигают 20–30 см), а ледяной покров не препятствует их образованию и не влияет на их продолжительность и период. Одна из основных причин колебания уровня воды – разность атмосферного давления на разных концах оз. Байкал, ветровая деятельность.

Эти обстоятельства дают основание для сохранения экологически сбалансированной системы, а также позволяют ставить вопрос о регулировании уровня озера в пределах средних многолетних колебаний, существовавших на Байкале до строительства Иркутской ГЭС, то есть внутригодовых колебаний в диапазоне 82 см. Безусловно, такая задача существенно осложняет работу гидроэнергетиков и выравнивает выработку электроэнергии по сезонам. Однако она реально выполнима при условии достаточного количества гидрологических постов (гп.) и точных метеопрогнозов, позволяющих заранее накапливать или, наоборот, сбрасывать объемы воды в теле Иркутского водохранилища.

#### Уровень оз. Байкал

В настоящее время определение уровня осуществляется только в одной точке – в порту Байкал (исток р. Ангары). На других шести постах Бурятского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (БЦГМС), расположенных на восточном и северном побережьях, выполняются только дополнительные измерения для контрольных отметок (рис. 3). По этим неполным данным разница синхронных наблюдений в разных пунктах достигает 19 см (рис. 4). При этом уровень измерений на гп. Байкал может превышать отметки постов восточного побережья, удаленных менее чем на 50 км, что противоречит законам гидрофизики. По тем же данным по отдельным декадам отмечается неизменный среднесуточный уровень – 456,04 м, тогда как на других постах отметки колеблются в широких диапазонах.

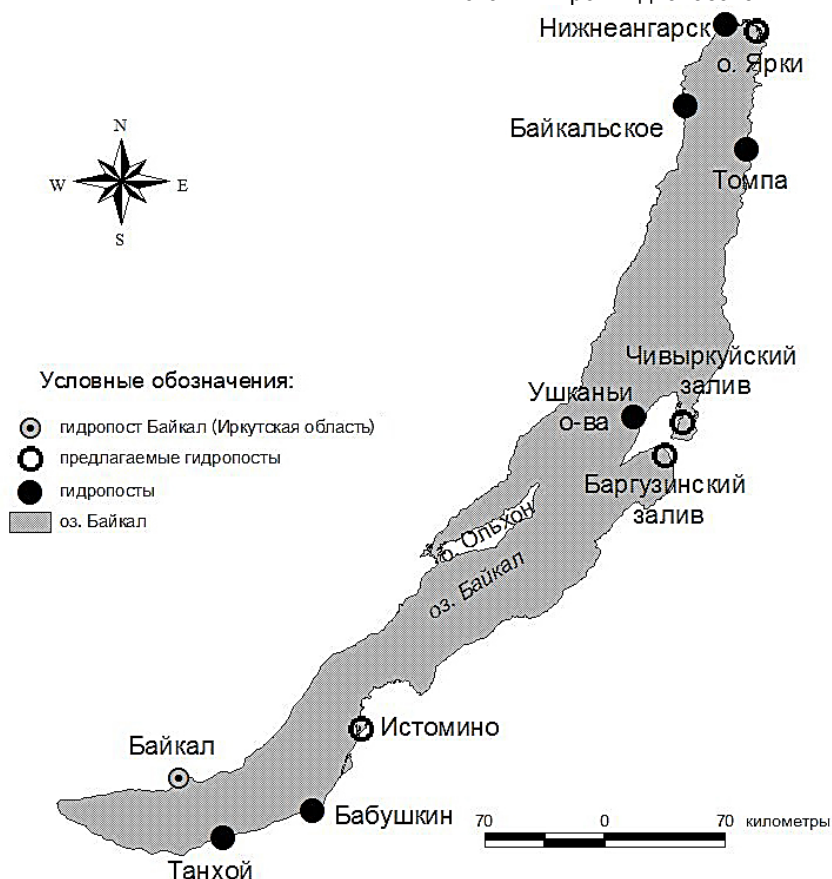


Рис. 3. Существующие и предлагаемые гидропосты сети БЦГМС на оз. Байкал

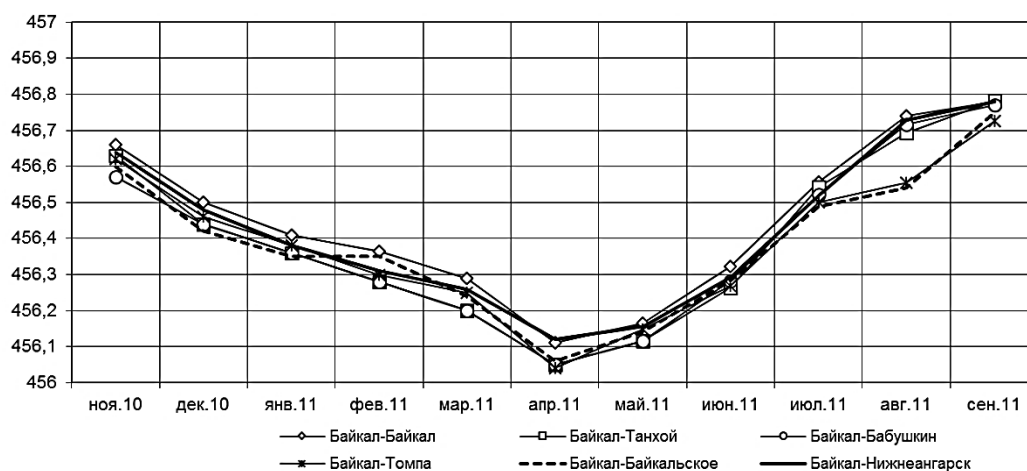


Рис. 4. Среднемесячные значения уровня оз. Байкал с ноября 2010 г. по сентябрь 2011 г. Август 2011 г.: гп. Байкал – 456,73 см; гп. Байкальское – 456,54 см; □ = 19 см

Указанные обстоятельства позволяют сделать вывод о том, что наблюдения, выполняемые на гп. Байкал, расположенном на территории Иркутской области, не совсем корректны и отражают ведомственные интересы ОАО «Иркутскэнерго», выработка электроэнергии которого зависит от объемов байкальской воды, сбрасываемой через каскад ГЭС.

В условиях недостатка гидрометеорологической информации, необходимости увеличения продуктивности байкальских мелководий и развития индустрии туризма в особых экономических зонах необходимо более бережное отношение к береговым процессам. Решить эту задачу можно только при условии законодательного сокращения амплитуды минимальных и максимальных отметок уровня оз. Байкал, определяемых природными условиями до строительства каскада ГЭС. Кроме того, для получения оперативной информации по уровню режиму и возможности его прогнозирования, а также для исключения влияния различных природных явлений на уровень водоема по всей акватории необходимо рассмотреть вопрос об увеличении количества гидропостов на восточном и северном берегах Байкала. В первую очередь в местах, защищенных от активной ветровой деятельности и приливно-отливных явлений. Предлагается организовать четырех новых гидропостов на восточном и се-

верном берегах оз. Байкал (см. рис. 3):

- 1) в с. Истомино в дельте р. Селенги;
- 2) на берегу Чивыркуйского залива;
- 3) на берегу Баргузинского залива;
- 4) в Дагарской губе к востоку от островной гряды Ярки.

Таким образом, появится возможность более эффективной эксплуатации каскада ангарских ГЭС, повышения объемов водных перевозок по Енисею и снижения потерь при катастрофических событиях в бассейне р. Селенги.

Также отметим, что в связи с планами гидротехнического строительства в Монголии проблема получения достоверной и распределенной системы гидрометеорологических данных и ее корректной интерпретации становится все более актуальной.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проектов РФФИ № 12-05-98066-р\_сибирь\_a «Комплексные исследования процессов деградации и опустынивания земель Байкальского региона с использованием геоинформационных технологий» и № 13-05-41378-РГО\_a «Трансформация природной среды Забайкалья и сопредельных территорий: ретроспективный анализ и современное состояние».*

Статья поступила 20.10.2014 г.

#### Библиографический список

1. Атлас Байкала. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1993. 160 с.
2. Вика С., Козырева Е.А., Тржцинский Ю.Б., Щипек Т. Острова Ярки на Байкале – пример современного преобразования ландшафтов. Иркутск – Сосновец: ИЗК СО РАН; Факультет наук о земле Силезского университета, 2006. 69 с.
3. Галазий Г.И. Байкал в вопросах и ответах. М.: Мысль, 1988. 221 с.
4. Гидроэнергетика и состояние экосистемы озера Байкал / ред. А.А. Атутов, Н.М. Пронин, А.К. Тулохонов (отв. ред.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 281 с.
5. Динамика берегов озера Байкал при новом уровне режиму / ред. А.А. Пинигин. М.: Наука. 1976. 88 с.
6. Иметхенов А.Б. Природа переходной зоны на примере Байкальского региона. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 231 с.
7. Мониторинг состояния озера Байкал / ред. Ю.А. Израэль, Ю.А. Анохин. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 262 с.
8. Потемкина Т.Г., Сутурин А.Н. Геоэкологические аспекты сохранения песчаного бара – о. Ярки (Северный Байкал) // Инженерная экология. 2011. № 6. С. 52–61.
9. Тулохонов А.К., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж., Андреев С.Г. Динамика изменения береговой линии оз. Байкал по разновременным космическим снимкам Landsat (на примере дельты р. Селенги) // Дельты Евразии: происхождение, эволюция, экология и хозяйственное освоение: мат-лы междунар. науч. конф. (Улан-Удэ, 16–20 августа 2010 г.). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2010. С. 103–110.