

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА



на правах рукописи

Тарасов Михаил Константинович

**Картографическая оценка баланса взвешенных веществ
в дельте реки Селенги по данным дистанционного зондирования**

25.00.33 – Картография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель – *Тутубалина Ольга Валерьевна – кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник*

Официальные оппоненты – *Барталев Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов спутникового мониторинга наземных экосистем Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)*

Голосов Валентин Николаевич – доктор географических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ им. М.В. Ломоносова

Медведев Андрей Александрович – кандидат географических наук, заведующий лабораторией картографии Института географии Российской академии наук (ИГ РАН)

Защита диссертации состоится «12» декабря 2019 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета МГУ.11.04 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: malyn2006@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/243979702/>

Автореферат разослан « 11 » ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.11.04,
кандидат географических наук



А.Л. Шныпарков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки картографических методов изучения дельты р. Селенги, являющейся главным биофильтром оз. Байкал. Река Селенга – крупнейший приток озера, приносит более двух третей от всего поступающего в него вещества. Бассейн реки расположен в густонаселенном трансграничном регионе, испытывающем возрастающую антропогенную нагрузку, которая вызывает значительное загрязнение речной воды. Последним звеном в бассейновой цепочке выступает дельта р. Селенги, которая служит геохимическим барьером на пути миграции веществ и играет ключевую роль в экологии всего оз. Байкал (Chalov et al., 2016). Особое внимание исследователей привлекают тяжелые металлы, которые токсичны при высоких концентрациях и входят в число основных измеряемых параметров при мониторинге окружающей среды (Лычагин и др., 2011).

Изучение стока наносов и сопутствующих загрязнителей проводилось в пределах дельты р. Селенги с момента первых инструментальных измерений. Несмотря на это, в настоящее время отсутствуют единые теоретические и методические подходы к изучению перемещения вещества на участках геохимических барьеров дельтовых областей, а также представления об их пространственной и временной изменчивости (Woo, 2004). Это связано с труднодоступностью и обширностью территорий, постоянной изменчивостью условий, сложностью организации полевых работ в условиях разветвленного русла. Поставленную проблему возможно решить с помощью картографического метода исследования, с опорой на данные дистанционного зондирования Земли. При расчете баланса взвешенных веществ космическая и аэросъемка дают уникальную возможность одновременно получить характеристики водной поверхности в вершине дельты и множестве устьев её проток, что практически невозможно сделать с помощью традиционных методов. Дистанционные методы давно используются при изучении ландшафтов водно-болотных экосистем (Adam et al., 2010; Armstrong, 1993; Балдина, Лабутина, 2011) и распространения взвешенных частиц (Härmä et al., 2001; Ruddick et al., 2008; Лабутина, Сафьянов, 1980; Лаврова и др., 2015), что даёт методологическую базу для создания комплексной методики оценки трансформации потоков вещества в дельте р. Селенги.

Цель диссертации – это разработка комплекса методик дешифрирования аэро- и космических снимков и создания карт для оценки баланса веществ, в том числе загрязняющих, поступающих вместе со стоком р. Селенги в её дельту.

Достижение поставленной цели предусматривает выполнение следующих **этапов работы**:

1. Обобщение мирового опыта моделирования концентрации взвешенных частиц в воде и дешифрирования водной растительности по мультиспектральным и гиперспектральным аэро- и космическим снимкам;

2. Разработка моделей перехода от яркостных параметров различных съемочных систем к значениям концентрации взвешенных частиц в воде р. Селенги, построение карт концентрации взвеси в воде и оценка пригодности различного вида съемочных систем для исследования баланса наносов;

3. Анализ факторов, влияющих на спектральный образ водной растительности дельты, разработка методики её картографирования и оценки занимаемой ею площади;

4. Разработка методики оценки баланса взвешенных наносов дельты по картам концентрации взвешенных частиц и анализ полученных результатов;

5. Разработка интегральной методики оценки баланса тяжелых металлов в пределах дельты по картам концентрации взвешенных частиц и полученных по снимкам данных о площади, занимаемой водной растительностью;

6. Разработка методики анализа факторов, влияющих на распространение твердого стока р. Селенги по акватории оз. Байкал, по серии карт концентрации взвешенных частиц в воде.

Методологическая база диссертационного исследования. В основе исследования лежат научно-методические принципы картографирования, разработанные К.А. Салищевым, А.М. Берлянтном; методы географического дешифрирования аэро- и космических снимков, разработанные Ю.Ф. Книжниковым, В.И. Кравцовой, И.А. Лабутиной, Г.А. Сафьяновым, О.В. Тутубалиной; методы изучения потоков мутневых вод, разработанные И.А. Лабутиной, П. Карлсоном, Д. Доксараном, и водной растительности, разработанные Е.А. Балдиной, Ч. Лейном, Р. Андервудом, Д. Дженсенем; опыт исследований дельты р. Селенги Б.А. Богоявленским, Т.Г. Потемкиной, Л.М. Корытным, Е.А. Ильичевой, М.Ю. Лычагиным, С.Р. Чаловым, методы статистического анализа данных.

Фактический материал. В основе диссертационной работы лежат исследования автора, проводимые с 2011 года в лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ и полевые исследования, проведенные автором в 2013-2016 годах на стационаре ФГБУН «Байкальский институт природопользования» СО РАН (с. Истомино). Основные исходные материалы в работе – более 80 мультиспектральных снимков, полученных со спутников серии Landsat, Sentinel 2, SPOT6, UK-DMC2, и более 3000 гиперспектральных снимков, полученных с применением дельталета ULM. Экспедиционные материалы, полученные непосредственно с участием автора, включают 340 точек определения геохимических свойств воды, 126 точек наземного полевого спектрометрирования и геоботанических описаний растительных сообществ.

Объектом исследования является дельта р. Селенги, **предметом** исследования – методы создания карт на основе данных дистанционного зондирования для оценки баланса взвешенных веществ в дельте.

На защиту выносятся следующие положения:

1. На основе данных дистанционного зондирования и предложенной автором методики возможно картографировать концентрацию взвешенных частиц в р. Селенге с погрешностью не более 4 мг/л (15% от наблюдаемого диапазона значений).

2. Картографирование погруженных в воду растений по аэро- и космическим снимкам следует проводить на основе их спектрального образа и с учетом данных об их местообитании (глубине погружения и мутности воды), что позволяет более полно оценить площади их распространения.

3. Разработанная методика оценки баланса наносов по картам концентрации взвешенных частиц впервые позволила оценить многолетний баланс взвешенных наносов в дельте р. Селенги.

4. Разработанная методика оценки баланса тяжелых металлов по совокупности карт концентрации взвешенных частиц и водной растительности позволяет оценивать баланс магния, алюминия, титана и таллия для дельты р. Селенги в целом, используя только космические снимки и информацию о расходе воды с гидрологического поста в вершине дельты.

Научная новизна диссертации заключается в разработке комплекса картографических методик для балансовой оценки трансформации вещества в геохимическом барьере дельтового типа на основе данных дистанционного зондирования Земли. Автором разработаны оригинальные методики: картографирования водной растительности на основе космических снимков с учетом многолетней динамики мутности воды; оценки биофильтрующей способности водной растительности дельты р. Селенги; оценки многолетней динамики баланса взвешенных наносов и оценки баланса тяжелых металлов по космическим снимкам. Впервые для ряда лет с помощью картографического метода исследования изучено влияние ветрового волнения на распространение взвешенных наносов р. Селенги по акватории оз. Байкал.

Практическая значимость работы и внедрение. Результаты исследования целесообразно применять для прогнозирования экологической функции дельты р. Селенги; при оценке состояния оз. Байкал как охраняемого природного объекта ЮНЕСКО. Разработанные автором методики могут быть использованы в качестве методического инструментария при выполнении исследований баланса веществ на участках разветвленного русла различных рек, а также в учебном процессе при подготовке специалистов в области географии и других дисциплин в вузах.

Материалы диссертации использованы в рамках научно-исследовательских работ «Оценка и прогноз трансграничного перемещения вредных (загрязняющих) веществ в системе река Селенга-озеро Байкал» (ФЦП), «Комплексная оценка влияния бассейна Селенги на озеро Байкал» (РГО), «Геохимические барьерные зоны в пресноводных дельтах рек России» (РГО-РФФИ), вошли в эколого-географический атлас-монографию «Селенга-Байкал» (РГО).

Апробация. Основные результаты диссертационного исследования докладывались на 12-й, 13-й и 15-й Всероссийских открытых конференциях "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" ИКИ РАН (2014, 2015, 2017), региональной конференции Международного географического союза (2015), 3-й Всероссийской конференции «Экология. Экономика. Информатика. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем (САМЭС)» (Дюрсо, 2015), 9-й конференции EARSeL по спектроскопии изображений (Люксембург, 2015), конференции «Объединённые исследования по проекту Селенга-Байкал» (Челен, 2016), конференции «Маккавеевские чтения» (Москва, 2016), на симпозиуме по естественным наукам и инженерии «GMIT» (Налайх, 2018).

По теме исследования имеется 8 публикаций, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (163 наименования, из которых 63 на русском и 100 на иностранном языке), 15 приложений. Материал изложен на 162 страницах машинописного текста, содержит 22 таблицы, 52 рисунка.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю О.В. Тутубалиной, И.А. Лабутиной за консультации и помощь в выборе темы исследования, В.И. Кравцовой, А.И. Прасоловой и С.В. Чистову за обстоятельное рецензирование текста работы, коллективу кафедры картографии и геоинформатики за ценные советы и рекомендации, М.В. Зимину, Е.А. Балдиной, и всем сотрудникам лаборатории аэрокосмических методов за обсуждение работы на семинарах и помощь в получении данных, М.Ю. Лычагину и студентам кафедры геохимии ландшафтов и географии почв за обеспечение возможности полевых работ и получение исходных материалов, Г.Л. Шинкарёвой за консультации по геохимии ландшафтов, В.О. Базиловой за совместную работу в дельте реки Селенги, Е.И. Голубевой, М.В. Слипенчуку, Й. Ахтману, Д. Константину, К. Барбье, М. Куберо-Кастану и всем сотрудникам лабораторий ТОРО и APHYS Федеральной политехнической школы Лозанны (EPFL), О.Б. Тарасовой, П.Д. Тарасовой.

Отдельно автор хочет выразить благодарность Сергею Романовичу Чалову. В рамках реализации проектов по изучению дельты реки Селенги было налажено плодотворное сотрудничество в области применения картографических методов для изучения гидрологических систем. Это сотрудничество помогло выбрать объект и предмет изучения и во многом определило вектор развития диссертационного исследования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Опыт исследования прибрежных экосистем с помощью данных дистанционного зондирования. Характеристика района исследования

Дельта р. Селенги является прибрежной экосистемой, сформировавшейся при впадении реки в оз. Байкал. С геохимической точки зрения, такие системы, как дельты рек, выступают как естественные биофильтры для приемных водоемов, задерживая до 90-95% поступающих взвешенных частиц и 20-40% растворенных (Lisitzin, 1995). Трансформация потоков веществ идет в пределах русел проток и на пойме, где особую роль занимает водная растительность, удерживая значительную часть взвешенных частиц. Морфологические процессы в дельте р. Селенги, в частности скорость её выдвижения в акваторию озера (около 0,75 см/год, Chalov et al., 2016), свидетельствуют об её активной аккумулярующей функции.

Мировой опыт показывает, что с опорой на дистанционные методы возможно решить проблему оценки транспорта взвешенного вещества в дельте и роли водной растительности в этом процессе. Для решения поставленной задачи необходимо разработать методику картографирования концентрации взвешенных частиц в воде и оценки биофильтрующей способности водной растительности дельты.

Количественные методы определения концентрации взвеси в воде по данным дистанционного зондирования строятся на положении, что существует определенная связь между яркостью пикселей на снимках и оптической мутностью воды, которая, в свою очередь, зависит от концентрации взвешенных частиц в ней. Для моделирования концентрации взвеси по снимкам необходимо иметь полевые данные, собранные непосредственно на изучаемом водном объекте, так как каждый из них имеет уникальные характеристики мутности вод (Wang et al., 2007). Несмотря на то, что проблема мутности воды в прилегающей к дельте акватории оз. Байкал изучается с 1970-х годов (Лабутина и др., 1976; Атлас..., 1982; Heim et al., 2005), до сих пор нет разработанной модели перехода от яркости пикселей снимков наиболее распространенных съемочных систем к значениям концентрации взвеси в воде в дельте р. Селенги.

Ранее выполнялись исследования фильтрующей функции водной растительности (Смолянинов, Рябухова, 1971; Распопов, Белова, 1987). Первым шагом к ее оценке является анализ фитомассы водных растений, для чего требуется информация о площади, занимаемой сообществами водных растений. В связи с труднодоступностью территории, достоверно это может быть оценено только по материалам дистанционного зондирования. Проблема картографирования прибрежных экосистем, в том числе с использованием дистанционных методов, широко освещена (Anderson, 1970; Jakubauskas et al., 2000; Ma et al., 2008). Большую сложность составляет разделение прибрежных растений по видам и дешифрирование подводных растений. Наилучшие

результаты в этой области достигаются с помощью использования снимков очень высокого пространственного разрешения (лучше 10 м) и с высоким спектральным разрешением (гиперспектральных). В последнее время появился ряд работ, направленных на картографирование растительности дельты р. Селенги по данным космической съемки (Lane et al., 2014; Plyicheva et al., 2015), однако детальной карты местообитаний водных видов растительности на всю территорию дельты составлено не было.

Всего несколько исследований было проведено по изучению общей фильтрующей функции дельты (Aynbund et al., 1975; Potemkina, Fialkov, 1993), но до настоящего момента не предложено методики оценки баланса взвешенных наносов и сопутствующих им поллютантов с разделением на русловую и пойменную составляющие, что связано с практической невозможностью таких расчетов по полевым измерениям.

Глава 2. Методика обработки данных дистанционного зондирования для моделирования концентрации взвешенных частиц в реке Селенге

На основе полевых данных рассчитаны модели перехода от яркости пикселей снимков в зеленом, красном, ближнем инфракрасном и панхроматическом (при наличии) каналах к концентрации взвешенных частиц (КВЧ) в воде для ряда съемочных систем, отличающихся пространственным и спектральным разрешением, технологией съемки. Отклонения по модели от полевых данных составили: для снимков Landsat 5/TM - 5-7 мг/л; для Landsat 8/OLI и UK-DMC2/SLIM-6-22 - 2 мг/л; для SPOT 6/NAOMI и Sentinel 2/MSI - 3 мг/л; для воздушной гиперспектральной системы ULM/Headwall не хватило данных для оценки погрешности.

Было установлено, что при малых значениях КВЧ лучше всего работают модели, основанные на линейной зависимости (Рис. 1). Опыты показали, что главным условием получения хорошей модели является квалифицированный набор полевых данных, характеризующийся, в первую очередь, максимальным охватом градиента мутности, от самых низких до самых высоких значений в пределах исследуемого объекта.

Для дельты было выделено несколько масштабных уровней изучения мутневых потоков и проведена оценка пригодности

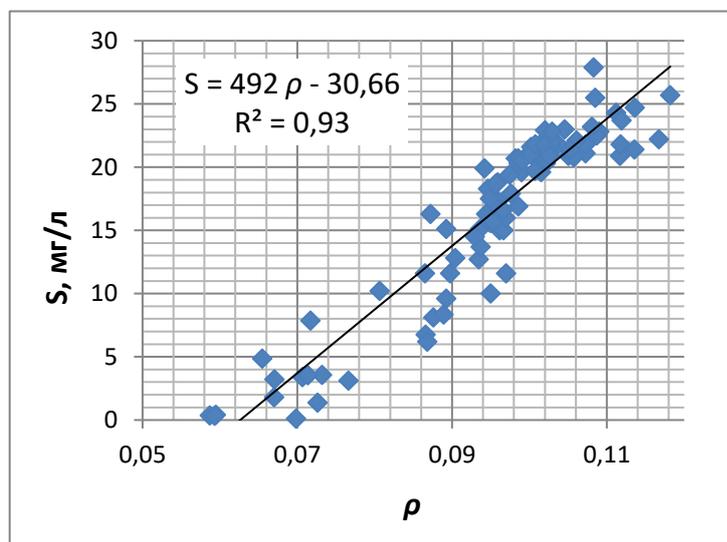


Рис. 1. Пример модели перехода от коэффициента отражения (ρ) на снимках Landsat 8/OLI (21.07.2013) в панхроматическом канале к концентрации взвеси в воде (S)

различных снимков для их картографирования. Было установлено, что задачу оценки баланса взвешенных наносов в дельте р. Селенги можно уверенно выполнить по картам, составленным по снимкам серии Landsat. Эти же снимки наиболее подходят для изучения маршрутов распространения облака взвеси по акватории оз. Байкал, так как имеют значительный охват, повторяемость и архив.

Анализ литературы и личные наблюдения автора показали, что водная растительность сильно восприимчива к мутности воды, в которой она произрастает. Для учета этой особенности была составлена карта режимов мутности воды в дельте (Рис. 2). Из архива было отобрано 82 безоблачных снимка со спутников Landsat 4,5,7 и 8, сделанных в период с 1989 по 2015 г. После проведения радиометрической и атмосферной коррекции по снимкам были построены карты распределения КВЧ. Средняя концентрация рассчитывалась как среднее арифметическое значение концентрации взвеси в каждом пикселе среди использованных изображений.

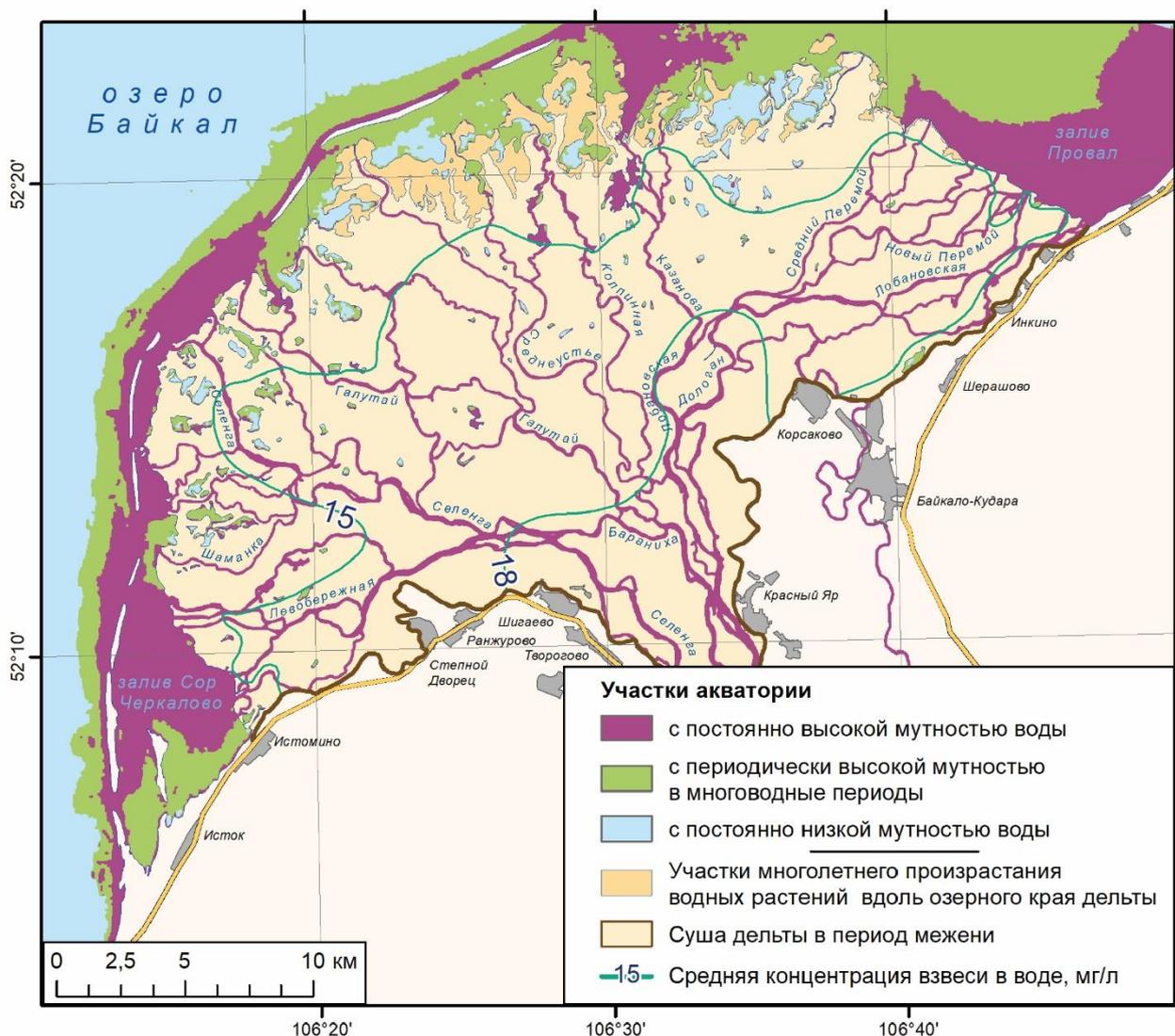


Рис. 2. Карта режимов мутности воды в протоках дельты и ее приустьевой части, масштаб картографирования 1:150 000

Главной задачей карты является выделение режимов мутности воды, то есть разграничение таких областей, где мутность всегда повышена, и где нет. Для этого изображение было квантовано на три градации, с выделением высокой (>10 мг/л в изучаемый период), средней (5-10 мг/л) и низкой (<5 мг/л) концентрации взвеси, соответствующих участкам с постоянно высокой, периодически высокой и постоянно низкой мутностью воды. Информация о количественных значениях концентрации взвеси нанесена на карту в виде изолиний и позволила увидеть закономерности распределения стока наносов по рукавам дельты: наиболее активны основное русло р.Селенги, а также протоки Левобережная, Казанова и Лобановская, что хорошо соотносится с литературными данными.

Глава 3. Методика анализа данных дистанционного зондирования для картографирования водной растительности дельты реки Селенги

В настоящей работе термин «водная растительность» (ВР) относится исключительно к многолетним растениям, полностью обитающим в водной среде. На предварительном этапе перед картографированием водных растений автором были выполнены полевые исследования спектрального образа водных растений. На основе анализа полученных кривых спектральной яркости были сделаны следующие заключения:

1. Спектральные образы подводной растительности уверенно отличаются от образов прибрежной растительности и растений с плавающими листьями. Между собой основные подводные виды, такие как рдест, уруть и элодея, практически не отличаются по спектральному образу;

2. Погруженные в воду растения уверенно дешифрируются при значительном проективном покрытии ($>70\%$), малой глубине погружения (<15 см) и небольшой мутности воды (<10 мг/л).

Полевые описания растительности были использованы для выбора эталонных и проверочных площадок при классификации снимков. Основным объектом интереса в дельте являются водные растения, однако при дешифрировании было выделено больше классов с целью повышения качества классификации. Среди опробованных методов классификации лучшие результаты показал метод максимального правдоподобия для снимка с наибольшим пространственным разрешением – SPOT 6/NAOMI (6 м). Для повышения достоверности классификации было проведено объединение классов растительности по местообитаниям. ВР была объединена в две большие группы: 1) растения с плавающими листьями, куда входят растения класса нимфеидов и ряска малая, и 2) погруженные в воду (подводные) растения, куда входят растения класса элодеидов совместно с ряской трехдольной и роголистником погруженным.

Съемочная система Sentinel 2/MSI имеет дополнительные узкие каналы съемки в ближней инфракрасной части спектра, нацеленные на лучшее дешифрирование растительности, что было использовано при попытке улучшить первоначальные результаты классификации изображений. В исследовании

Ч. Лейна и др. (Lane et al., 2014) применен метод повышения размерности снимка для последующей классификации путем включения в набор каналов, помимо оригинальных спектральных зон, также индексных изображений, что позволяет повысить вес определенных спектральных каналов при классификации. Выбранные вегетационные индексы (MTCI, PSSRa, REIP, RVI, TSAVI) повысили достоверность классификации на 3% для обучающих выборок и на 9% для проверочных. Показатели достоверности для обоих классов водных растений составили 95%, что оказалось даже несколько выше, чем для снимка SPOT 6/NAOMI. Это показало, что высокое спектральное разрешение и наличие специальных узких каналов у снимка может повысить достоверность классификации до уровня классификации по снимку с лучшим пространственным разрешением. Съемка системой Sentinel 2/MSI производится с высокой частотой и снимки свободно распространяются, поэтому для картографирования растительности был выбран снимок этой съемочной системы (16.08.2016 г.).

При составлении карты была оценена вероятность произрастания подводной растительности. Основными факторами, влияющими на места произрастания подводных видов, являются скорость течения, мутность воды и глубина (Садчиков, Кудряшев, 2005). Глубина произрастания основной массы водных растений дельты ограничена 2 м, и эта изобата, выделенная по топографической карте масштаба 1:50 000 (1986 г.), была использована как граница области картографирования в озере. Граница на суше была определена на основе работы Е.И. Ильичевой и др. (Ilyicheva et al., 2015).

Поскольку подавляющая часть взвешенных наносов привносится в дельту вместе со стоком р. Селенги, то об относительной скорости потока можно судить по мутности воды. В связи с этим карта режимов мутности была интерпретирована следующим образом:

1. Участки с постоянно низкой мутностью (средняя КВЧ <5 мг/л) – зона наиболее вероятного местообитания подводной растительности. Подводная растительность на этих участках не может быть с уверенностью дешифрована в связи с тем, что произрастает глубже уровня проникновения солнечных лучей в воду в ближней инфракрасной части спектра (15 см), однако все условия для комфортного произрастания подводных видов здесь имеются.

2. Участки с периодически высокой мутностью (5-10 мг/л) – зона вероятного местообитания подводной растительности. Зона характеризуется повышением мутности воды в годы с высоким расходом воды. При условиях постоянно высокого стока в этих областях не формируется подводной растительности, в то время как в маловодные годы эти области вполне пригодны для ее произрастания.

3. Участки с постоянно высокой мутностью (>10 мг/л) – зона маловероятного обитания подводной растительности. В связи с постоянно высокой мутностью воды и скоростью течения эти местообитания наименее вероятно заняты водными растениями.

Из трех выделенных классов первые два вошли в легенду карты как растения с высокой вероятностью наличия и с низкой вероятностью наличия. Карта водной растительности составлена в проекции исходных космических снимков (UTM, зона 48N), в масштабе 1:10 000, при котором хорошо читается высокая мозаичность контуров водных растений, с цензом отбора контуров по площадям 0,1 см² в масштабе карты. В уменьшенном виде карта представлена на рис. 3.

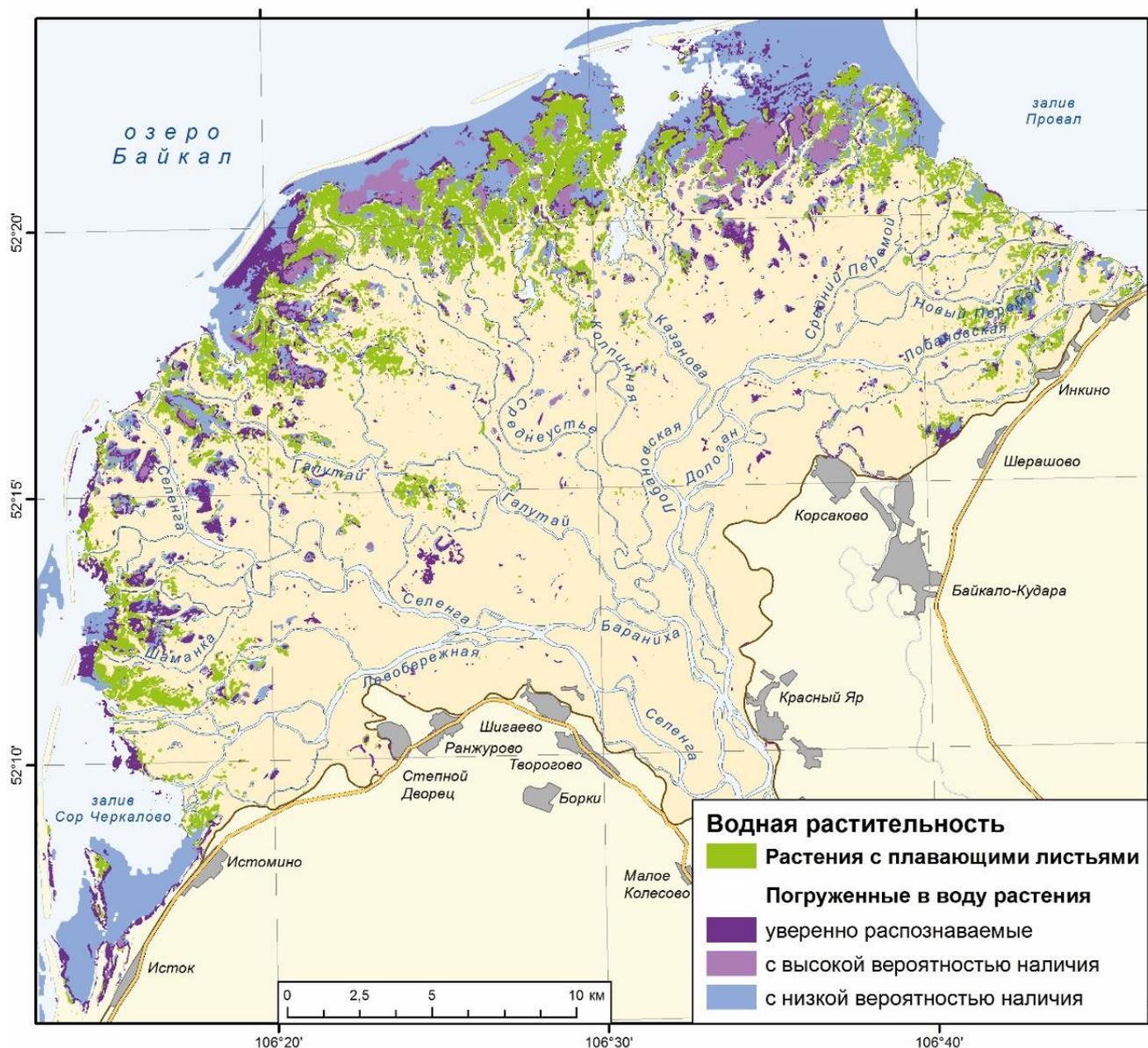


Рис. 3. Карта водной растительности дельты р. Селенги, уменьшенная до масштаба 1:150 000

Карта позволяет дать количественную оценку площади, занимаемой ВР, с учетом тех местообитаний, где погруженная в воду растительность не распознается на космических мультиспектральных снимках в оптическом диапазоне, но, судя по косвенным признакам, должна находиться. По карте установлено, что растения с плавающими листьями занимают 8% дельты,

погруженные в воду растения занимают от 4% до 16%. Если сравнивать с проведенными ранее расчетами площади ВР дельты (Puicheva et al., 2015), то полученная в работе оценка в 2-4 раза выше, что говорит о значительной недооцененности распространения водных растений в дельте.

Глава 4. Методика картографической оценки баланса потоков веществ в дельте реки Селенги

Разработанные методики картографирования концентрации взвешенных частиц (КВЧ) и водной растительности (ВР) позволили впервые комплексно оценить баланс взвешенных наносов и связанных с ними тяжелых металлов (ТМ) в дельте р. Селенги. Помимо трансформации наносов, дельта выступает и как агент обширного распространения взвешенных частиц в оз. Байкал. Картографический метод исследования был применен для изучения факторов, влияющих на распространение взвеси по акватории озера.

Оценка баланса взвешенных наносов. Оценка баланса взвешенных наносов позволяет понять условия прохождения потоков через дельту и выявить факторы, определяющие эрозионно-аккумулятивные процессы в ней. При расчете баланса взвешенных наносов (ΔW) весь поток приходящей взвеси был разделен на две составляющие, русловую (ΔW_p) и пойменную, включающую в себя аккумуляцию на водной растительности ($\Delta W_{п+вр}$).

$$\Delta W = \Delta W_p + \Delta W_{п+вр}.$$

Анализ баланса проводился на основе карт концентрации взвешенных частиц, составленных по 82 снимкам серии Landsat (с 1989 по 2015 гг.).

Для оценки продольных изменений стока взвешенных наносов в пределах **руслового** сегмента было выделено 7 модельных профилей (проток), относящихся к разным секторам дельты, для которых были построены профили изменения КВЧ в воде (Рис. 4, профили П1-П7). Изменение КВЧ (ΔS_0) рассчитывалось по формуле:

$$\Delta S_0 = S_2 - S_1,$$

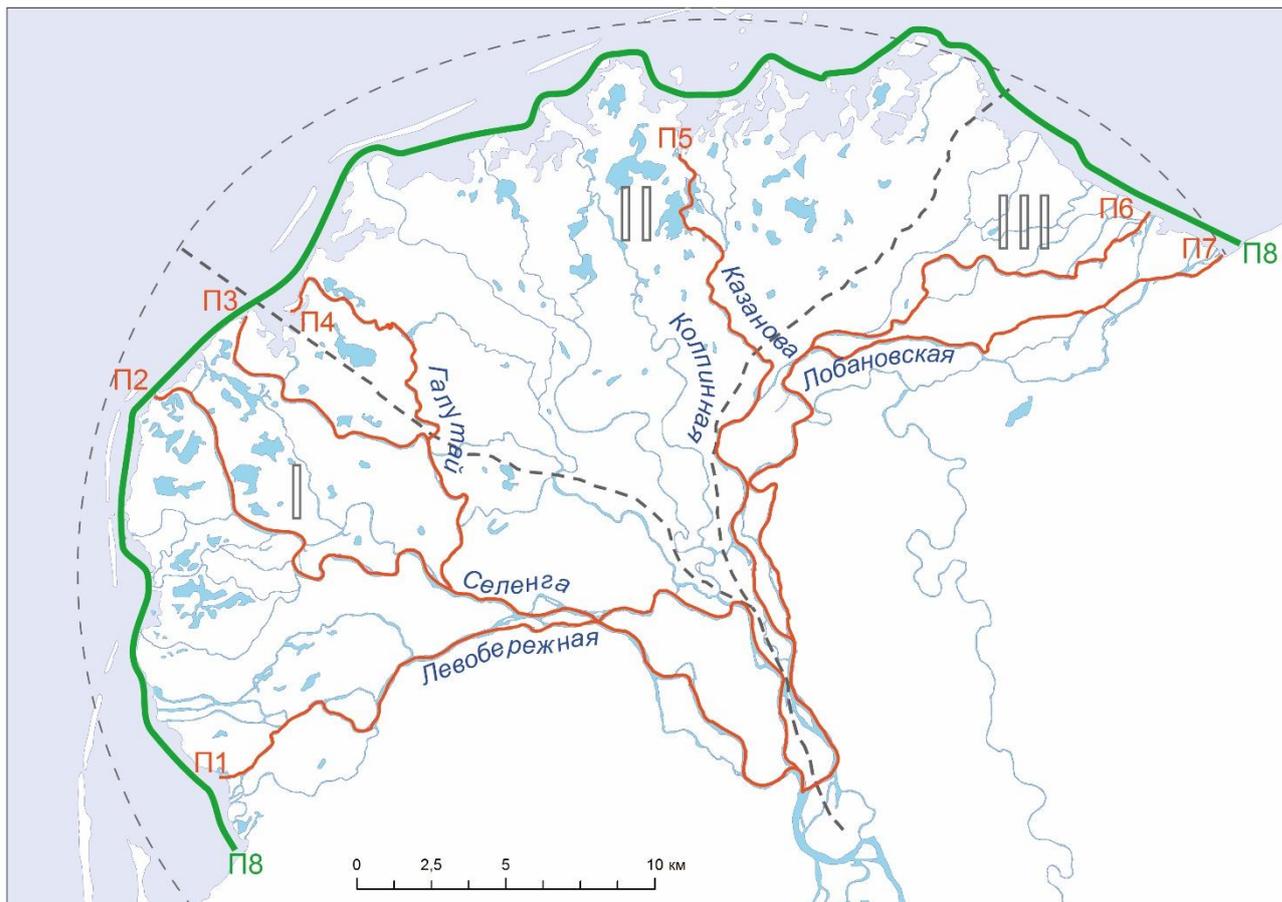
где S_1 и S_2 – значения КВЧ в верхней (вершина дельты) и нижней (устье) частях проток (профилей) (мг/л) соответственно, определяемых как среднее значение по 300 м протоки. Для расчета относительного изменения концентрации взвеси в воде (ΔS , %) использовалось отношение:

$$\Delta S = \Delta S_0 / S_1 * 100.$$

Изменение расхода взвешенных наносов (ΔW_p) оценивалось для разных секторов дельты балансовым методом (Алексеевский, 1998):

$$\Delta W_p = W_{p\ out} - W_{p\ in},$$

где $W_{p\ in}$ и $W_{p\ out}$ – сток взвешенных наносов (т/сутки) на верхней и нижней границах системы соответственно, рассчитываемый как произведение КВЧ (мг/л) на расход воды (м³/с).



- П1 — Профили концентрации взвеси по основным протокам
- П8 — Профиль концентрации взвеси по озерному краю дельты
- - - Границы секторов дельты

Рис. 4. Положение профилей изменения концентрации взвешенных частиц

Для оценки баланса наносов в пределах всего массива дельты ($\Delta W_p + \Delta W_{п+вр}$) был проведен анализ разницы КВЧ между значением в вершине дельты и средним значением концентрации взвеси в озерном крае дельты. Последний показатель был получен при помощи построения профиля вдоль озерной границы дельты и последующего расчета среднего значения КВЧ по нему (Рис. 4, профиль П8).

Рассматривались три варианта соотношения между выходящими и входящими потоками наносов: $W_{out} > W_{in}$, $W_{out} < W_{in}$ и $W_{out} \approx W_{in}$. Они соответствовали неравенствам $\Delta S > 0$, $\Delta S < 0$ и $\Delta S = 0$, которые указывают на положительный (преобладание эрозии), отрицательный (преобладание аккумуляции) баланс взвешенных наносов (Рис. 5). Равновесный баланс наблюдается для небольшого количества ситуаций.

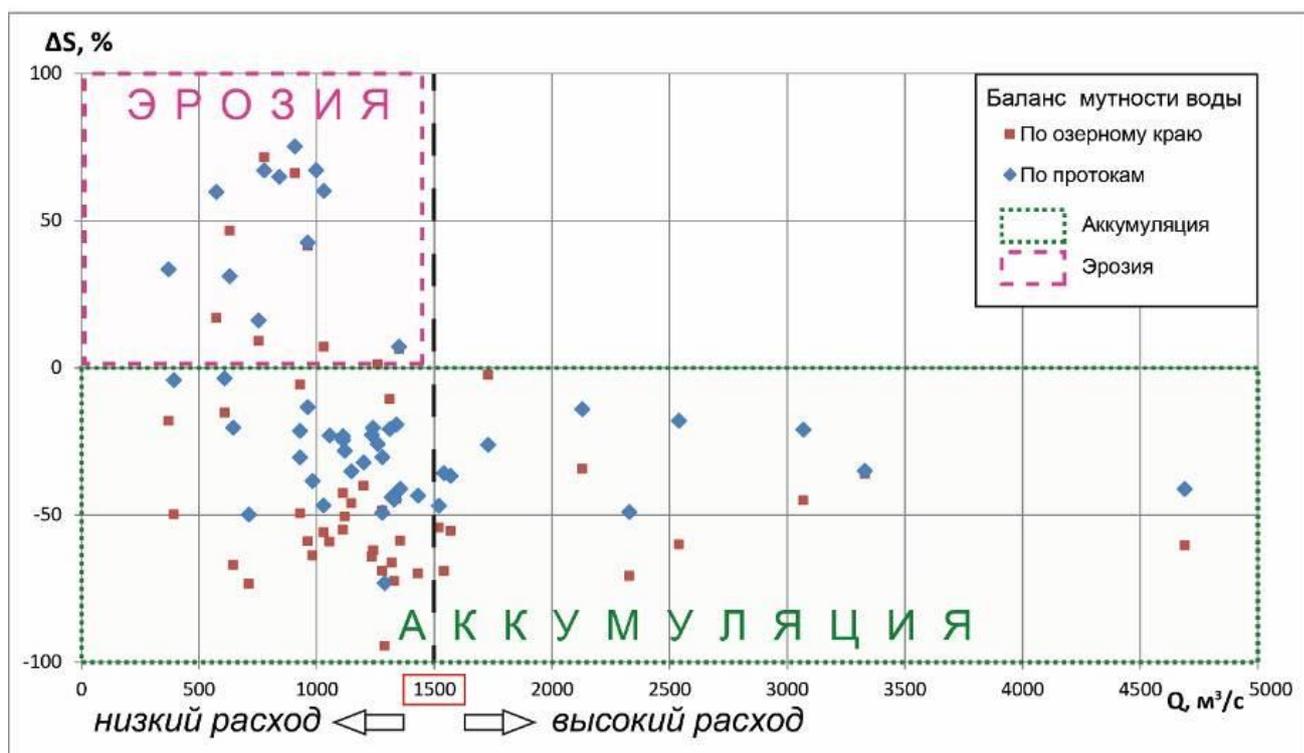


Рис. 5. Изменение баланса концентрации взвешенных частиц (ΔS) по озерному краю и по основным рукавам дельты Селенги в зависимости от расхода воды (Q) в створе, расположенном выше дельты р. Селенги

Исследование показало, что в целом в дельте р. Селенги в 80% случаев аккумуляция преобладает над эрозией, и только в 20% случаев наблюдаются выраженные эрозионные процессы. В среднем, аккумуляция составляет 15% от поступающего стока взвешенных веществ для руслового сегмента и такой же вклад вносит пойменный сегмент, то есть суммарная аккумуляция составляет 30%. Положительный баланс взвешенных наносов, то есть продольное увеличение расхода наносов, отмечается только при пониженной водности, когда расход воды в вершине дельты не более 1500 м³/с. Это может быть связано с увеличением русловой эрозии в рукавах дельты, а также с нагонами со стороны Байкала и подпорах в устьях протоков в маловодные периоды.

Чтобы понять, как соотносится затопление поймы с расходами воды и, соответственно, условиями прохождения потоков вещества через дельту, была разработана методика оценки затопляемости пойменных массивов дельты по схемам, составленным на основе космических снимков (Рис. 6).

При сравнительном анализе схем дешифрирования было выявлено, что протоки сохраняют свои берега при расходах воды примерно до 1500 м³/с. Это те случаи, когда в формировании баланса взвешенных веществ работает преимущественно русловой сегмент дельты. При увеличении расходов вода выходит на поверхность дельтовой поймы и начинает активно работать пойменный сегмент. Однако, ситуация высокого расхода воды была в последний раз зафиксирована на снимке 2003 г., что говорит о том, что в последнее время роль пойменного сегмента в фильтрующей функции дельты заметно снижена.

Прослеживается также четкая временная динамика средних значений балансов в течение года. Значения максимальны весной, далее снижаются летом и осенью опять немного повышаются, что можно связать с активной биофильтрующей функцией водной растительности дельты летом.

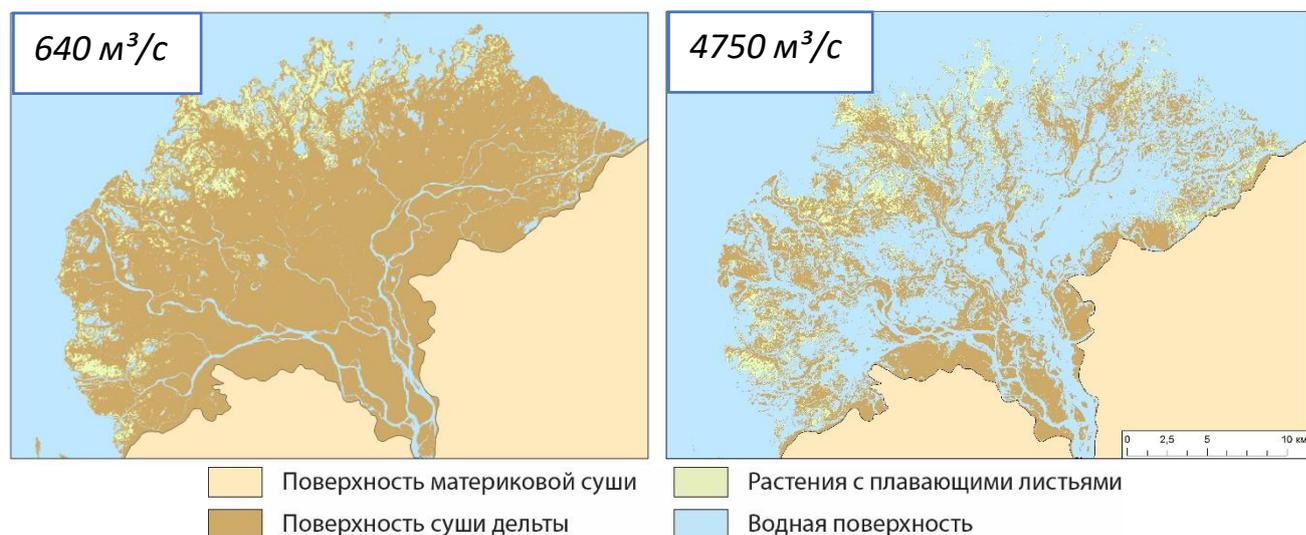


Рис. 6. Условия прохождения минимальных (31.08.2015 г. - слева) и максимальных (01.09.1990 г. - справа) расходов воды в дельте р. Селенги

Полученные данные по балансу хорошо соотносятся с единичными оценками, проводившимися ранее для дельты р. Селенги инструментальными методами (Potemkina, Fialkov, 1993; Дельта..., 2008). Следовательно, разработанные методы анализа баланса наносов по космическим снимкам можно считать эффективной альтернативой полевым исследованиям.

Оценка баланса тяжелых металлов в дельте реки Селенги. Интегральная модель оценки баланса тяжелых металлов (ΔM) основывается на гипотезе о дискретности процессов осаждения вещества в дельте (ΔMa), включающих в себя баланс в пределах основных протоков (ΔMp), периодически затапливаемых пойменных массивов (ΔMp) и зарослей водных растений ($\Delta Mвр$):

$$\Delta M = \Delta Ma + \Delta Mt;$$

$$\Delta Ma = \Delta Mp + \Delta Mp + \Delta Mвр,$$

где ΔMt – сток тяжелых металлов в озеро, кг/сут.

Предположение, что концентрация тяжелых металлов (ТМ) зависит от концентрации взвешенных частиц в воде (ΔS), позволяет использовать карты КВЧ для перехода к балансу тяжелых металлов в дельте. Для этого полевые данные о КВЧ (мг/л) и концентрации тяжелых металлов (мкг/л) в воде были сопоставлены и рассчитаны регрессии между ними на основе выборки из 40 точек. Для актуальных для р. Селенги ТМ - магния (Mg), алюминия (Al), титана (Ti) и таллия (Tl), максимальные погрешности составили 15% при коэффициенте детерминации R^2 от 0,61 до 0,95, что говорит о хорошей связи концентрации этих ТМ с концентрацией взвешенных частиц.

Для апробации методики была использована карта КВЧ, составленная по снимку Landsat 8/OLI (21.07.2014 г.). По ней были получены данные о концентрации взвешенных частиц в вершине (Sv), по озерному краю (Sa) и по основным протокам (Sp). Аналогичные расчеты были проведены как для дельты в целом, так и для каждого из её секторов. Для расчета расхода ТМ была использована информация о расходах воды в вершине дельты (гидропост в п. Кабанск).

Концентрация взвеси в воде в совокупности с данными о расходе воды даёт значение расхода взвешенных частиц в единицу времени. По уравнениям связи концентрации ТМ с концентрацией взвеси возможно перейти к расходам ТМ в дельте из расчета, сколько килограммов каждого ТМ проходит через дельту за сутки. Аналогично балансу взвешенных наносов, баланс ТМ можно рассчитать для русловой и пойменной составляющей отдельно.

Оценка доли ВР в аккумуляции ТМ проводилась на основе расчета её фитомассы. Полевые данные концентрации ТМ в растениях были сопоставлены с площадью, занятой выделенными классами, рассчитанной по карте ВР. Поскольку экспедиционные исследования концентрации ТМ в растениях (Шинкарева, 2018) проходили в конце лета, было принято, что это максимальная концентрация ТМ, которую могут накопить растения в течение вегетационного периода. Исходя из данных о том, что вегетационный период в южной части Байкала длится около 110 дней, было рассчитано накопление ТМ в растениях к дате съемки ($d = 63$ дня от начала вегетационного периода).

В результате получен общий баланс каждого вида тяжелого металла, в котором выделены русловая и пойменная составляющие, а также вклад ВР дельты. На рис. 7 представлена концептуальная схема интегральной модели оценки баланса тяжелых металлов в дельте р. Селенги. Цветом выделены параметры, которые необходимо указать в модели для расчета значений: Sv, Sa, Sp - КВЧ в вершине дельты, по озерному краю и в устьях главных проток, соответственно, Q, Qp – расход воды в вершине дельты и доля русловой составляющей, Rвр – площадь, занятая ВР дельты.

В среднем для четырех металлов (Mg, Al, Ti, Tl) показатель аккумуляции в дельте на дату съемки составляет 43% от поступающего объема, из которых 73% приходится на русловую составляющую, 23% на пойменную и 3% на долю водной растительности. Результаты расчетов представлены в виде карт (пример на рис. 8).

Аналогов такого рода исследований, охватывающих одновременно всю дельту р. Селенги и вычленяющих отдельные составляющие баланса ТМ, на данный момент не имеется. Однако исследования отдельных компонентов баланса, например пойменных проток Селенгинского и Среднеустьевского секторов (Chalov et al., 2015) и ВР дельты (Akhtman et al., 2014) хорошо соотносятся с полученными результатами.

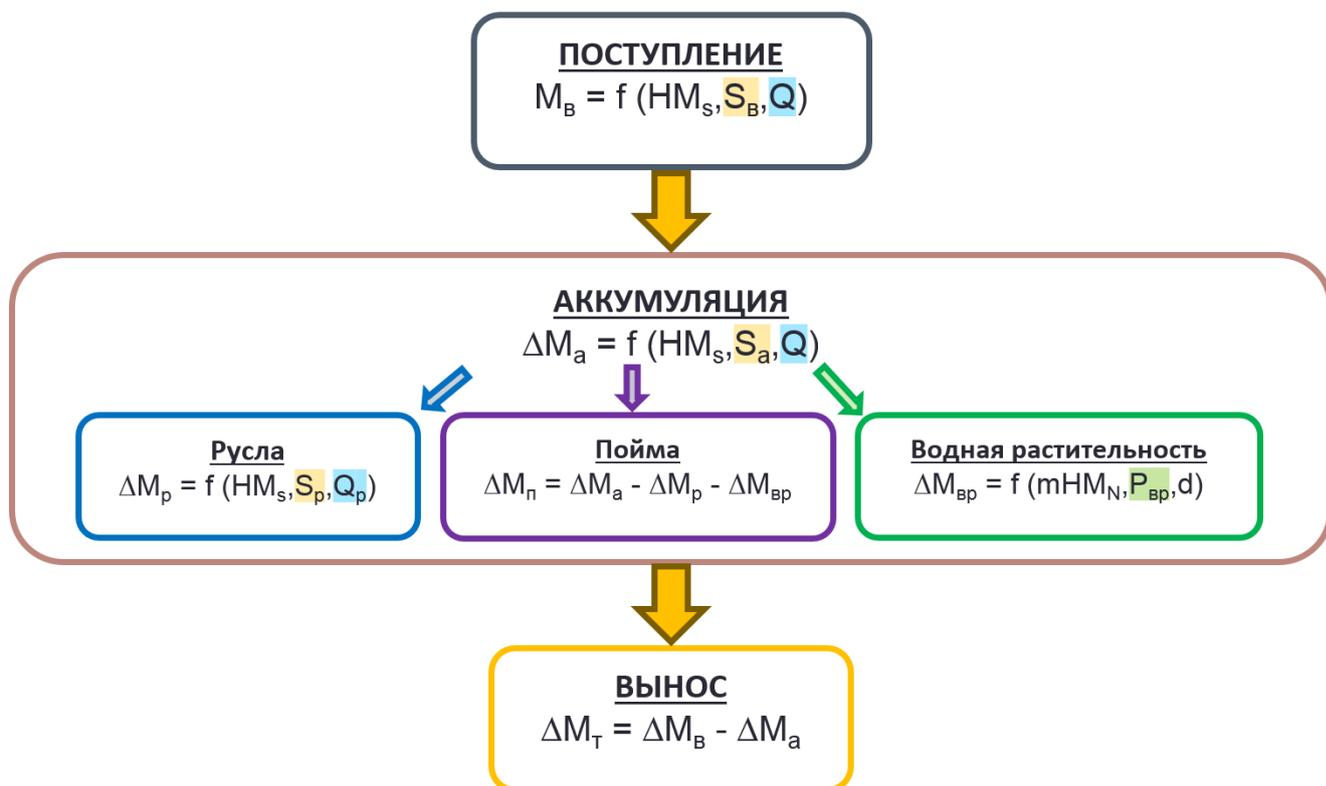


Рис. 7. Концептуальная схема интегральной модели оценки баланса тяжелых металлов в дельте р. Селенги. HM_s – концентрация ТМ во взвеси, $мкг/г$

Выполненная оценка позволила сформулировать ряд рекомендаций по дальнейшему улучшению модели. Во-первых, модель расчета концентрации ТМ по концентрации взвеси в воде не охватывает всех ситуаций, в связи с чем необходимо выполнить полевые работы в различные фазы водного режима и с разными расходами воды. Во-вторых, необходимо отдельное изучение соотношения состояний ТМ при перемещении, для оценки не только тех металлов, что перемещаются во взвешенном состоянии, но и тех, что перемещаются в растворенном и влекаемом. В-третьих, необходимо изучение условий, в которых водные растения разных видовых групп произрастают одновременно на одной площади (на разных уровнях) и вклад водной растительности в механическое удержание взвеси.

Разработанные методики картографической оценки баланса взвешенных наносов и сопутствующих им поллютантов могут быть применены для других дельт рек мира и участков разветвленного русла. Для этого требуется как минимум один полевой сезон сбора информации о концентрации взвешенных частиц в воде, и при широком развитии водной растительности – информации о преобладающих видах, их местообитаниях и концентрации загрязняющих веществ в них.

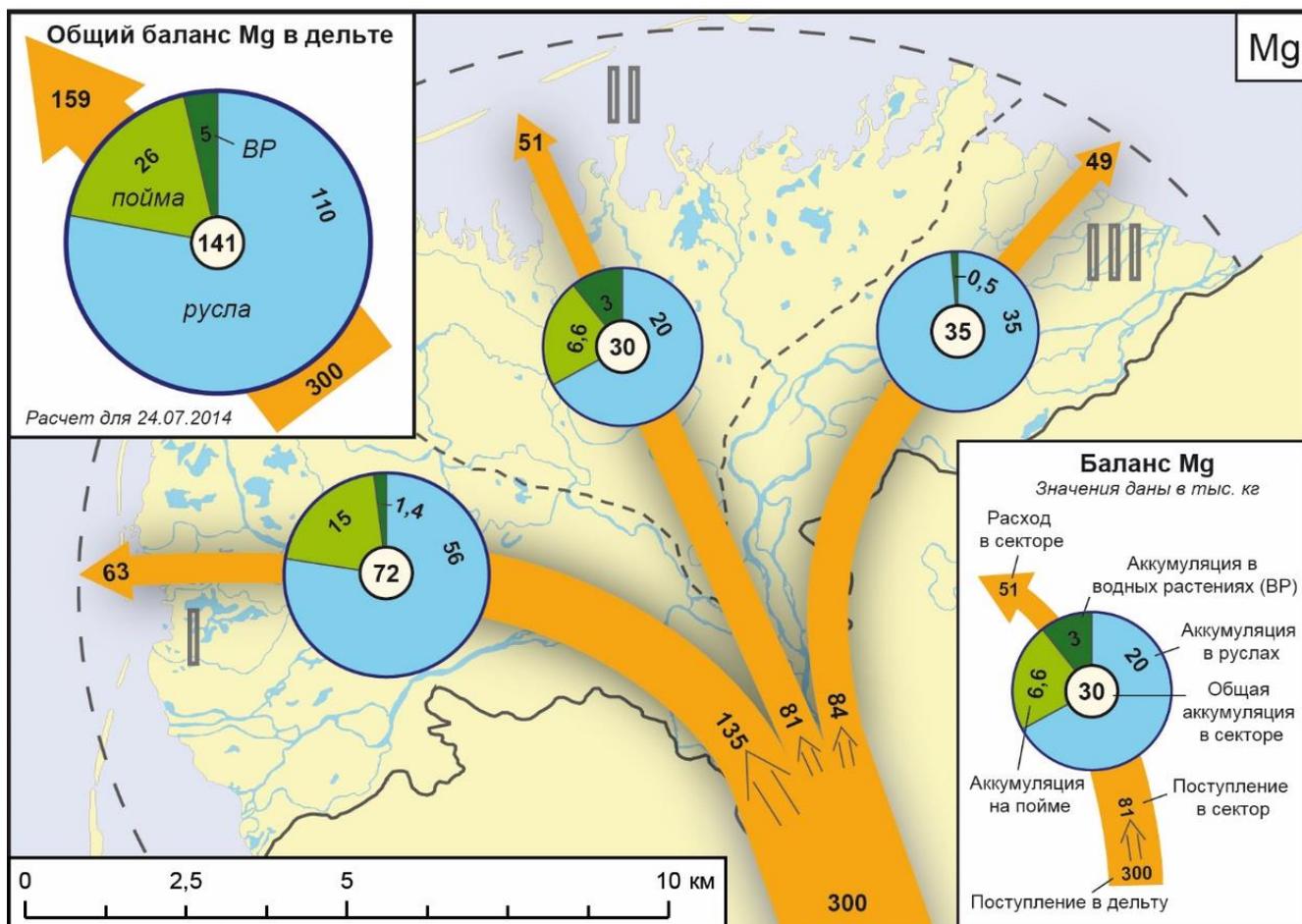


Рис. 8. Баланс Mg по секторам дельты, рассчитанный для 24.07.2014 г., масштаб картографирования 1:300 000. Сектора дельты: I – Селенгинский, II – Среднеустьевский, III – Лобановский

Изучение распространения взвешенных частиц, поступающих с твердым стоком реки Селенги в акваторию озера Байкал

Для оценки факторов, влияющих на распространение облака взвеси по акватории озера, была построена серия карт КВЧ на основе снимков со спутников Landsat с применением методики разноглубинного картографирования мутневых потоков. В анализе использованы три снимка 2001 г., сделанные в июне, августе и октябре, и снимки 2011 и 2014 гг., полученные в августе. Значения КВЧ были квантованы в качественные градации мутности, чтобы можно было сравнить маршруты распространения взвеси по серии снимков (пример на рис. 9). По картам исследовалось влияние объема стока воды, постоянных и временных (вызванных приповерхностным волнением) течений и рельефа дна авандельты на форму облака взвеси.

Составленные карты позволили впервые показать первостепенную роль сильных ветровых воздействий на характер распространения твердого стока реки по акватории озера (Лабутина, Тарасов, 2018). Также по серии многолетних карт было подтверждено, что при спокойных погодных условиях твердый сток

распространяется согласно главенствующим постоянным течениям в озере, с поправкой на рельеф дна.

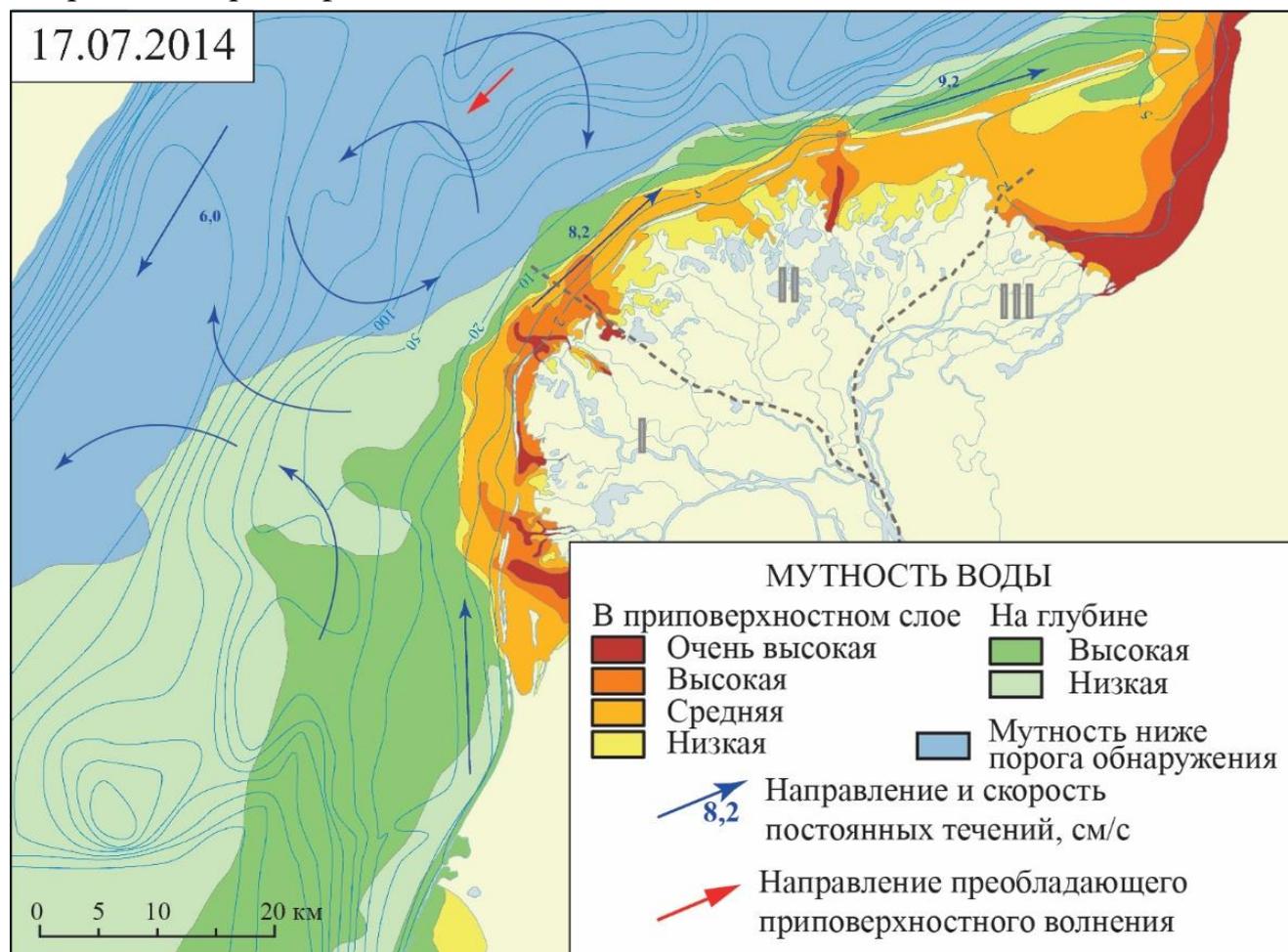


Рис. 9. Карта мутности воды в прилегающей к дельте акватории оз. Байкал, созданная по снимку Landsat 8/OLI (17.07.2014), масштаб картографирования 1:250 000

Зафиксированные по снимкам маршруты распространения взвешенных наносов р. Селенги для 2001 и 2014 годов полностью совпадают с теми, что были получены в 1976 и 1982 годах (Лабутина, Сафьянов, 1980, Атлас..., 1982). Следовательно, характер распространения взвешенных наносов р. Селенги при спокойных погодных условиях сохраняется как минимум на протяжении последних сорока лет.

Дистанционные методы позволяют количественно оценить распространение взвеси в прилегающей к дельте акватории озера. Например, при спокойных условиях и среднем уровне расхода воды (1500 м³/сек) облако взвеси от р. Селенги распространилось на расстояние 100 км от дельты и затронуло до 70% площади всего озера. В ходе анализа было установлено, что относительная площадь распространения взвеси высокой концентрации напрямую связана с объемом стока: чем он выше, тем площадь больше, при спокойных погодных условиях. Профили мутности, построенные от края дельты вглубь озера,

показывают, что КВЧ резко падает в пределах первых 5 км от дельты, в зависимости от стока наносов. Дальше значения мутности практически не изменяются при возрастании глубины.

Заключение

Проведенная работа позволила сформулировать следующие выводы:

1. К настоящему времени накоплен обширный мировой опыт картографирования концентрации взвешенных частиц в воде и водной растительности дельт рек по данным дистанционного зондирования Земли. Однако, несмотря на высокую актуальность проблемы перемещения вещества на участках геохимических барьеров, нет разработанных методик картографической оценки баланса наносов и сопутствующих им поллютантов в таких системах в целом и в дельте р. Селенги в частности.

2. На основе проведенных полевых исследований, для р. Селенги были разработаны модели перехода от яркостных параметров снимков к значениям концентрации взвешенных частиц в воде для следующих съемочных систем: Landsat 5/TM, Landsat 7/ETM+, Landsat8/OLI, UK-DMC 2/SLIM-6-22, Sentinel 2/MSI, SPOT 6/NAOMI, ULM/Headwall.

3. Картографирование водной растительности, особенно погруженных в воду видов, необходимо проводить с учетом многолетней динамики мутности воды и глубины погружения растений. Карта водной растительности, созданная на основе дешифрирования снимка Sentinel 2/MSI и карты режимов мутности воды, позволила выделить не только видимые контуры водной растительности, но и оценить ее вероятные местообитания. Занимаемая ей совокупная площадь в дельте р. Селенги оказалась до 4 раз больше, чем было ранее известно.

4. На основе разработанной методики картографирования концентрации взвешенных частиц в воде впервые оценен многолетний баланс взвешенных наносов в дельте. Установлено, что при расходах воды в вершине дельты выше 1500 м³/с однозначно преобладают процессы аккумуляции над процессами эрозии, что связано с выходом воды из русел проток на пойму. Для составленных 82 карт концентрации взвешенных наносов за 1989-2015 гг. аккумуляция преобладала в 80% случаев. В среднем дельта аккумулирует около 30% взвешенных наносов, при этом русловая и пойменная составляющие баланса вносят равный вклад.

5. Разработанная интегральная методика оценки баланса тяжелых металлов в дельте р. Селенги позволила впервые приблизиться к комплексному пониманию вклада аккумуляции в русловых и пойменных отложениях и в водной растительности в процесс фильтрации тяжелых металлов. Методика позволяет оценить баланс тяжелых металлов для конкретной даты съемки, используя в качестве источников данных только космический снимок и информацию о расходе воды в вершине дельты, без привлечения полевых данных.

6. С помощью картографического метода исследования возможно эффективно изучать факторы, влияющие на распространение твердого стока р. Селенги по акватории оз. Байкал. Установлено, что наибольшее влияние на путь распространения облака взвеси от реки влияет сильное ветровое волнение, однако при спокойных погодных условиях твердый сток распространяется согласно сформированным в озере постоянным течениям. Площадь распространения определяется объемом стока реки и может затрагивать до 70% акватории озера.

Основные научные результаты опубликованы в индексируемых научных изданиях (Scopus, Web of Science, RSCI):

1. Лабутина И.А., **Тарасов М.К.** Изучение распространения твердого стока реки Селенги по космическим снимкам // География и природные ресурсы, 2018. № 1. С. 66-72. (Импакт-фактор 0,905)

2. **Тарасов М.К.**, Тутубалина О.В. Методика определения мутности воды в р. Селенге и прилегающей акватории оз. Байкал по данным дистанционного зондирования // Исследования Земли из космоса, 2018. № 1. С. 60-71. (Импакт-фактор 0,897)

3. Чалов С.Р., Базилова В.О., **Тарасов М.К.** Баланс взвешенных наносов в дельте Селенги в конце XX-начале XXI века: моделирование по данным снимков Landsat // Водные ресурсы, 2017. 44. №3. С. 1-8. (Импакт-фактор 1,585)

4. Chalov S., Thorslund J., Kasimov N., Aybullatov D., Ilyicheva E., Karthe D., Kositsky A., Lychagin M., Nittrouer J., Pavlov M., Pietron J., Shinkareva G., **Tarasov M.**, Garmaev E., Akhtman Y., Jarsjo E. The Selenga River delta: a geochemical barrier protecting Lake Baikal waters // Regional Environmental Change, 2016. 17. №7. P. 1-15. (Импакт-фактор 3,792)

В прочих изданиях:

1. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Алексеенко А.А., Базилова В.О., Бешенцев А.Н., Богданова М.Д., Гармаев Е.Ж., Герасимова М.И., Голованов Д.Л., Головлев П.П., Гончаров А.В., Горбунова И.А., Гречушников М.Г., Гунин П.Д., Доржготов Д., Ефимов В.А., Ефимова Л.Е., Завадский А.С., Ильичева Е.А., Марьянский В.В., Морейдо В.М., Павлов М.В., Пашкина М.П., Романченко А.О., Рыжов А.В., Рябова Н.В., Сазонов А.А., Салтыкова Е.А., Шальнова (Сорокина) О.И., **Тарасов М.К.**, Тимофеев И.В., Чернов А.В., Шинкарева Г.Л., Jarsjo J., Karthe D., Pietron J., Thorslund J. Эколого-географический атлас-монография «Селенга-Байкал» / Под ред. Н.С. Касимова. М.: Географический факультет МГУ, 2019. 288 с.

2. Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л., **Тарасов М.К.** Потоки тяжелых металлов в бассейне р. Селенги // Геохимия ландшафтов. К 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана / Под ред. Н.С. Касимова, А.Н. Геннадиева. АПР Москва, 2017. С. 402–430.

3. Тутубалина О.В., Зимин М.В., Голубева Е.И., **Тарасов М.К.**, Михеева А.И., Еремкина П.Г., Аляутдинов А.Р., Самсонов Т.Е. Опыт создания спектральной библиотеки водной и наземной растительности ключевых участков дельты р. Селенга // Экология, экономика, информатика, 2015. 3. С. 92-101.

4. Chalov S., Bazilova V., **Tarasov M.** Modelling suspended sediment distribution in the Selenga River Delta using Landsat data // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2017. 375. P. 19-22.