

М.К. ТАРАСОВ^{*,**}, Г.Л. ШИНКАРЕВА^{*}, С.Р. ЧАЛОВ^{*}, О.В. ТУТУБАЛИНА^{*}

^{*}Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, mixail.tarasov@gmail.com, galina.shinkareva@gmail.com,
srchalov@gmail.com, olgatut@mail.ru

^{**}ООО «ФРЭКОМ», 119435, Москва, ул. Малая Пироговская, 18, стр. 1, Россия,
mixail.tarasov@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛАНСА ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ДЕЛЬТЕ СЕЛЕНГИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Представлена методика оценки распределения потоков взвешенных наносов и металлов по рукавам дельты р. Селенги и их накопления водной растительностью на основе моделирования по спутниковым снимкам Landsat-5, -7, -8 и Sentinel-2/MSI с уточнением по полевым данным 2011–2016 гг. Разработанная методика имеет большой потенциал применения, поскольку позволяет получить количественные характеристики баланса взвешенных наносов и металлов на основе только космических снимков и данных о расходах взвеси и металлов в вершине дельты. Расчет баланса наносов позволил впервые получить количественные данные о взаимосвязи эрозионно-аккумулятивных процессов с расходом воды в дельте р. Селенги: при расходах воды более 1500 м³/с наблюдается устойчивое преобладание аккумуляции наносов в дельте. При меньших расходах встречаются случаи продольного увеличения стока взвешенных наносов, связанные с нагонами со стороны Байкала и русловой эрозией в рукавах. В среднем в дельте аккумулируется около 30 % потока взвешенных наносов. На примере отдельной ситуации показано, что 43 % потока исследуемых металлов (Mg, Al, Ti, Tl) было аккумулировано в дельте 24 июля 2014 г. При накоплении металлов на долю русловой и пойменной составляющих приходится 73 и 23 % соответственно, на долю водной растительности — 3 %.

Ключевые слова: металлы, концентрация взвешенных частиц, космические снимки, Landsat, Sentinel-2, аккумуляция, биогеохимический барьер.

М.К. TARASOV^{*,**}, G.L. SHINKAREVA^{*}, S.R. CHALOV^{*}, O.V. TUTUBALINA^{*}

^{*}Lomonosov Moscow State University,
119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia,
mixail.tarasov@gmail.com, galina.shinkareva@gmail.com, srchalov@gmail.com, olgatut@mail.ru

^{**}FRECOM Ltd., 119435, Moscow, ul. Malaya Pirogovskaya, 18, str. 1, Russia,
mixail.tarasov@gmail.com

MODELING OF THE BALANCE OF SUSPENDED SOLIDS IN THE SELENGA DELTA FROM REMOTE SENSING DATA

This paper describes the methodology developed for assessing the distribution of suspended sediment fluxes and metals along the Selenga delta channels and their accumulation by aquatic vegetation, based on the interpretation of Landsat-5, -7 and -8 and Sentinel-2/MSI satellite images, with clarification according to field data collected in 2011–2016. The methodology has a high potential for application, because it allows to obtain quantitative characteristics of the suspended sediment and metals balances based only on satellite images and data on discharges of suspended matter and metals at the delta apex. Calculation of sediment budget allowed us to obtain first quantitative data on the relationship of erosion-accumulation processes with water discharges in the Selenga river delta: for water discharges larger than 1500 m³/s, a steady predominance of sediment accumulation in the delta was observed. For smaller discharges there are cases of a longitudinal increase in the suspended sediment flux related with pileup from Lake Baikal and channel erosion in the delta arms. On average about 30 % of suspended sediment flux accumulates in the delta. Using an example of July 24, 2014, it was shown that 43 % of the investigated metals flux (Mg, Al, Ti, Tl) under investigation was accumulated in the delta. In the case of metals accumulation, the channel and floodplain components account for 73 and 23 %, respectively; 3 % is due to aquatic vegetation.

Keywords: metals, suspended sediment concentration, satellite images, Landsat, Sentinel-2, accumulation, biogeochemical barrier.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Геохимические барьеры, т. е. участки земной коры, на которых на коротком расстоянии происходит резкое изменение интенсивности миграции химических элементов [1], являются глобальным фактором трансформации стока с континентов в приемные водоемы. Наиболее значительную роль в этом массопереносе играют устьевые области крупных рек, где перенос воды и веществ испытывает влияние от снижения уклонов водной поверхности, явлений подпора, воздействий от разнообразных сорбентов и водной растительности. Особенно это характерно для пресноводных дельт, где при отсутствии влияния морских факторов наблюдается резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов, что позволяет относить их к латеральным геохимическим барьерам или даже барьерным зонам [2–4]. В настоящее время дельты исследованы в основном только с точки зрения гидродинамики и особенностей рассредоточения стока, при этом отсутствуют единые теоретические и методические подходы к изучению перемещения вещества в пределах геохимических барьерных зон дельтовых областей [2], а представления о его пространственной и временной изменчивости нуждаются в конкретизации.

Среди пресноводных дельт России внимание ученых привлекает дельта р. Селенги, рассматриваемая как важнейший фильтр для загрязняющих веществ на пути с водосбора в оз. Байкал [5]. В последние годы были проведены детальные исследования многолетней и сезонной изменчивости баланса взвешенных наносов в дельте Селенги с применением методов спутникового моделирования концентрации взвешенных частиц [6]. Собраны уникальные базы данных о формах транспорта металлов, распределении их потоков в разные сезоны и их накоплении водной растительностью (макрофитами) [7–10]. Эта информация позволяет впервые для крупных дельтовых систем рек мира разработать и реализовать концептуальную основу комплексной оценки трансформации химического стока. В работе проведена адаптация возможностей дистанционных методов к изучению геохимии аквальных ландшафтов дельты; представлена разработка единой методики, основанной на применении спутниковых данных и натурных (подспутниковых) наблюдений за потоками взвешенных веществ и металлов и их накоплением водной растительностью дельты; дана оценка распределения потоков наносов и металлов по рукавам дельты Селенги.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Дельта р. Селенги — это устье крупнейшего притока оз. Байкал. Среднегодовой объем стока воды Селенги составляет 28 км³/год, взвешенных наносов — 1,73 млн т/год [11]. В результате сооружения Иркутской ГЭС (1956 г.) площадь дельты уменьшилась и в современный период составляет около 558 км² [12]. До урегулирования амплитуда колебания уровня Байкала составляла около 2,5 м [13], после — снизилась до 1 м, что привело к уменьшению влияния уровневого режима озера на формирование дельты. В период исследований в связи с маловодьем и в целом пониженным заполнением Иркутского водохранилища уровень воды в оз. Байкал не оказывал существенного влияния на режим дельты. При сопоставлении колебаний уровня воды оз. Байкал и баланса стока взвешенных наносов, которое проводилось ранее [14], количественных связей между режимом дельты и уровнями озера установлено не было.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные дистанционного зондирования. Исследование базируется в первую очередь на данных со спутников Landsat-5, -7, -8 (82 снимка в летние сезоны 1989–2015 гг., пространственное разрешение 15–30 м). Также был использован снимок Sentinel-2/MSI от 16 августа 2016 г. (разрешение 10–20 м). Для всех снимков была проведена радиометрическая и атмосферная коррекция с переводом «сырых значений яркости» DN в коэффициенты спектральной яркости (КСЯ).

Полевые данные. В работе использовались материалы пяти экспедиционных исследований в дельте р. Селенги: в 2011 г. в период с 8 по 20 августа, в 2013 г. — с 6 по 26 июля, в 2014 г. — с 29 июля по 16 августа, в 2015 г. — с 14 по 17 июля, в 2016 г. — с 28 июля по 8 августа (рис. 1).

За это время накоплена база данных из 340 точек, в которых измерялись концентрации взвешенных частиц и отбирались пробы воды для определения содержания металлов во взвешенных наносах. В 43 точках проводился отбор преобладающих видов водных растений (124 пробы) с целью определения их фитомассы и концентрации металлов в них. Для дешифрирования водной растительности

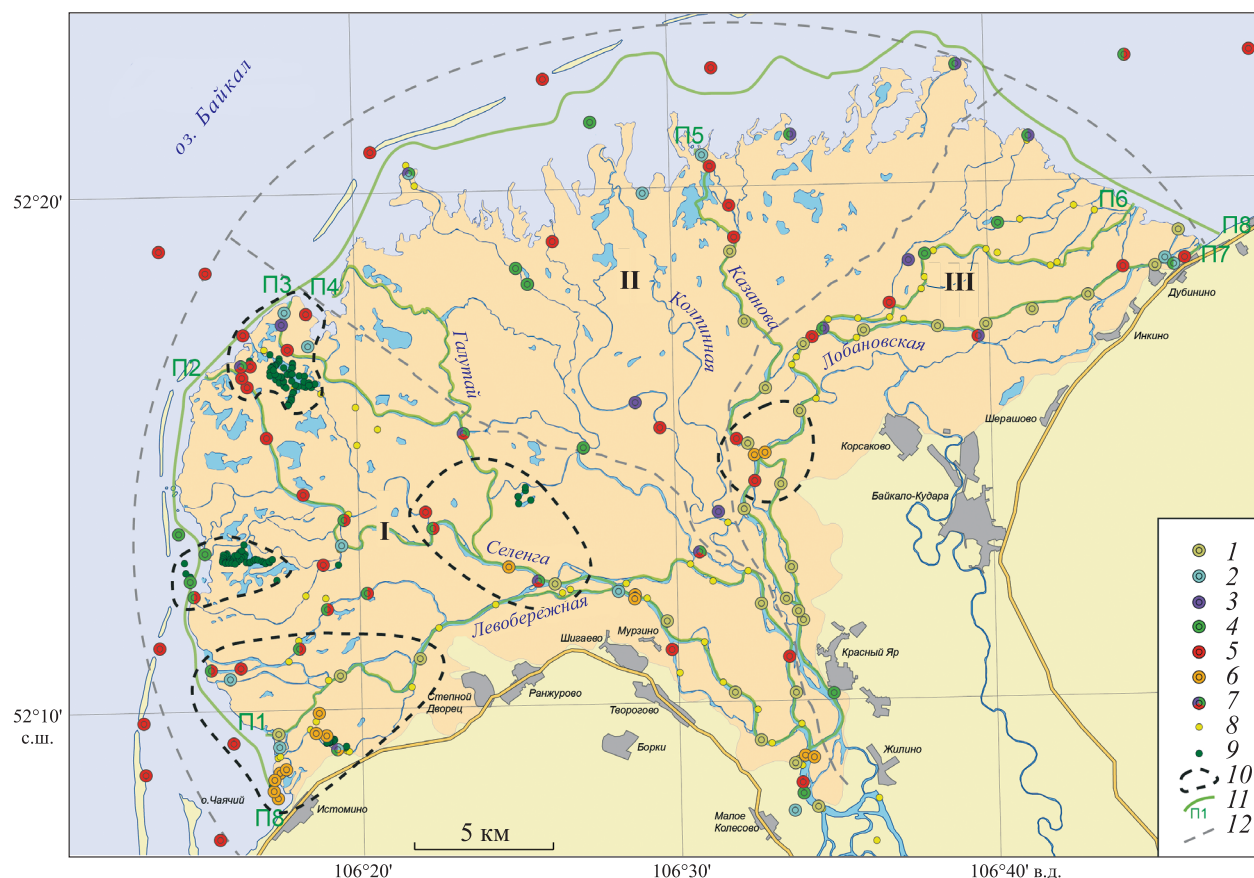


Рис. 1. Полевые измерения в дельте реки Селенги в 2011–2016 гг., м-б 1:150 000.

Станции отбора проб воды: 1 — 2016 г., 2 — 2015 г., 3 — 2014 г., 4 — 2013 г., 5 — 2012 г., 6 — 2011 г. 7 — многолетние станции отбора проб. Точки измерения мутности: 8 — 2013 г., 9 — 2016 г. 10 — основные районы описаний растительных сообществ. 11 — основные профили мутности по протокам: П1 — Левобережная, П2 — Селенгинская (основное русло), П3 — Галутай, П4 — Средняя, П5 — Казанова, П6 — Новый Перемой, П7 — Лобановская. П8 — профиль вдоль озерного края дельты. 12 — границы секторов дельты: I — Селенгинский, II — Среднеустьевский, III — Лобановский.

дельты в 2015 и 2016 гг. были проведены полевые спектрометрические работы [15], в ходе которых получено 126 спектральных образов растительности, в первую очередь водной. На каждой площадке спектрометрирования фиксировалась информация о видовом составе растительности, ее проективном покрытии и глубине погружения.

Высушенные пробы взвешенных наносов и макрофитов анализировались масс-спектральным (ICP-MS) и атомно-эмиссионным (ICP-AES) методами в лаборатории Всероссийского НИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского для определения концентрации 32 металлов (Me) в них. Данные по расходам воды в вершине дельты получены по гидрологическому посту Забайкальского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, расположенному на верхней границе дельты (гидропост Мостовой).

Методика оценки баланса взвешенных наносов и металлов во взвеси. Расчет баланса взвешенных наносов (ΔW_a , т/сут) основан на гипотезе о дискретности процессов осаждения вещества в дельте. Рассматривается осадконакопление в пределах: 1) основных рукавов (проток) (ΔW_p), 2) периодически затопливаемых пойменных массивов и небольших проток, включая аккумуляцию в толще водной растительности ($\Delta W_{п+вр}$). Каждый из указанных процессов функционально связан с расходом воды p . Селенги по гидропосту Мостовой (Q_a) и концентрацией взвешенных частиц в ней (S): $\Delta W = f(Q_a, S)$. Информация о концентрации взвешенных частиц в воде получена путем моделирования по космическим снимкам [14]. В нашем случае использовались снимки серии Landsat, для которых было проведено сравнение полевых данных о концентрации взвеси в воде со значениями яркости пикселей

снимков по известной методике [16]. Погрешность определения концентрации взвеси в воде составила 3,6 мг/л для снимков Landsat-8/OLI и 5,8 мг/л для снимков Landsat-5 5/TM, что соответствует 15–20 % от диапазона значений концентрации взвеси в исследуемый период в дельте р. Селенги.

Общий баланс взвешенных наносов (ΔW_a) представлен как разность между объемом потока веществ в вершине дельты (W_b) и на выходе из нее (W_T), а также как сумма русловой (ΔW_p) и пойменной ($\Delta W_{п+вр}$) составляющих трансформации вещества:

$$\Delta W_a = W_b - W_T = \Delta W_p + \Delta W_{п+вр}. \quad (1)$$

Сток взвешенных наносов в вершине дельты (W_b , т/сут) рассчитывался по формуле

$$W_b = S_b \cdot Q_b \cdot 86\,400 \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где S_b — концентрация взвеси в вершине дельты (мг/л), Q_b — расход воды в р. Селенге ($\text{м}^3/\text{с}$) у гидропоста Мостовой, 10^{-6} — коэффициент перевода миллиграммов в тонны, 86 400 — коэффициент перевода секунд в сутки.

Показатель стока взвешенных наносов по озерному краю дельты (W_T , т/сут) был получен путем расчета среднего значения концентрации взвеси в пределах профиля мутности (см. рис. 1, профиль П8), построенного вдоль озерной границы дельты (S_T , мг/л), и сопоставления этой величины с расходом воды в вершине дельты (Q_b , $\text{м}^3/\text{с}$):

$$W_T = S_T \cdot Q_b \cdot 86\,400 \cdot 10^{-6}. \quad (3)$$

При анализе было сделано допущение, что суммарный расход воды в устьях дельтовых проток равен расходу в ее вершине.

Для оценки продольных изменений стока взвешенных наносов в пределах руслового сегмента (ΔW_p , т/сут) было выделено семь модельных профилей проток (см. рис. 1, профили П1–П7), относящихся к разным секторам дельты. Для каждой из выделенных проток строился продольный профиль изменения концентраций взвеси в воде (ΔS_{pk}), по которому рассчитывалась разность между значениями концентрации взвеси в вершине дельты (S_b) и в устьях модельных проток (S_{pk}), где k — каждая из семи модельных проток. Для расчета баланса взвешенных наносов в пределах руслового сегмента среднее значение баланса взвеси по всем профилям (ΔS_p , мг/л) соотносилось с расходом воды в вершине дельты:

$$\Delta W_p = \Delta S_p \cdot Q_b \cdot 86\,400 \cdot 10^{-6}. \quad (4)$$

Баланс наносов в пределах поймы и в водных растениях ($\Delta W_{п+вр}$) определялся как разность между общим балансом (ΔW_a) и русловой составляющей (ΔW_p):

$$\Delta W_{п+вр} = \Delta W_a - \Delta W_p. \quad (5)$$

Таким образом, указанная выше методика дает возможность рассчитать все составляющие баланса взвешенных наносов, представленные в формуле (1).

По материалам полевых исследований было установлено, что концентрация нескольких из 32 анализируемых металлов в воде (M_{Me} , мкг/л) коррелирует с концентрацией взвеси (S , мг/л), т. е. $M_{Me} = f(S)$. На основе выборки из 40 точек были рассчитаны регрессионные зависимости от концентрации взвеси четырех модельных металлов (Mg, Al, Ti, Tl), которые характерны для тонкодисперсных фракций взвешенных наносов крупностью менее 10 мкм и преобладающей формой транспорта которых является взвешенная (более 0,45 мкм) [17–19]. Указанные элементы демонстрируют наиболее достоверные связи с концентрацией взвеси в воде в дельте Селенги и поэтому выбраны в качестве модельных:

$$M_{Mg} = 11,80 \cdot S - 7,62; \quad (6)$$

$$M_{Al} = 75,51 \cdot S - 258,39; \quad (7)$$

$$M_{Ti} = 3,81 \cdot S - 9,83; \quad (8)$$

$$M_{Tl} = 0,0005 \cdot S - 0,0014. \quad (9)$$

Отклонение модельных значений от измеренных в поле рассчитывалось с использованием проверочной выборки из 20 точек, отобранных в рамках той же экспедиции, и составило максимум 15 % при коэффициенте детерминации R^2 от 0,61 до 0,95.

Концентрация Me во взвеси (M_s , мкг/г) для модельных точек определяется по следующей формуле:

$$M_s = M_{Me}/(S \cdot 10^3), \quad (10)$$

где M_{Me} — концентрация каждого металла в воде, мкг/л; S — концентрация взвеси, мг/л; 10^3 — коэффициент перевода мг в г.

Оценка накопления металлов в водной растительности дельты. Для оценки накопления Mg, Al, Ti и Ti водной растительностью использовались сведения об их концентрации в разных видах макрофитов (C_{Me} , мг/кг), полученные по полевым данным из лаборатории. Поскольку на анализ отдавались образцы водных растений вместе с накопленным на них взвешенным веществом (эпифитовзвесью), то эти концентрации учитывают не только металлы, поглощенные из речной воды и содержащиеся непосредственно в самих растениях, но и элементы, входящие в состав удержанной растением эпифитовзвеси. Были выделены две основные группы макрофитов: 1) растения с плавающими листьями: кубышка малая (*Nuphar pumila*), нимфейник щитовидный (*Nymphoides peltata*), стрелолист плавающий (*Sagittaria natans*) и ряска малая (*Lemna minor*); 2) погруженные в воду (подводные) растения: рдесты курчавый (*Potamogeton crispus*), гребенчатый (*P. pectinatus*) и пронзеннолистный (*P. perfoliatus*), уруть колосистая (*Myriophyllum spicatum*), элодея канадская (*Elodea canadensis*), ряска трехдольная (*Lemna trisulca*) и роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum*).

Максимально возможное накопление элемента в группе n водной растительности (mM_n , кг) за вегетационный период определялось как

$$mM_n = C_{nMe} \cdot B_n \cdot P_n / 10^6, \quad (11)$$

где C_{nMe} — средняя концентрация элемента в группе n водной растительности в конце вегетационного периода (мг/кг мокрого веса), рассчитанная на основе полевых и лабораторных данных; B_n — средняя фитомасса растений группы n , кг/м²; P_n — площадь распространения группы n в дельте, м²; 10^6 — коэффициент перевода из мг в кг.

На основе полевых спектрометрических работ было установлено, что по своему спектральному образу группы растений с плавающими листьями и погруженные в воду растения уверенно отличаются как друг от друга, так и от прибрежной растительности. Однако внутри групп спектральные образы растений практически идентичны. Было выявлено также, что погруженные в воду растения уверенно распознаются на снимках только при соблюдении нескольких условий: 1) высокое проективное покрытие (>70 %); 2) малая глубина погружения (<15 см); 3) небольшая мутность воды (<10 мг/л). Таким образом, значительная часть растений не может быть дешифрована по прямым дешифровочным признакам.

Для картографирования растительности дельты был выбран снимок Sentinel-2/MSI (16 августа 2016 г.), имеющий дополнительные, по сравнению со снимками Landsat, каналы в ближнем инфракрасном участке спектра. В качестве метода классификации с обучением был выбран метод максимального правдоподобия. При классификации в набор спектральных каналов снимка был включен ряд рассчитанных по нему вегетационных индексов: 1) индекс наземного хлорофилла MTCI; 2) пигментно-специфичный индекс хлорофилла a PSSRa; 3) точка перегиба спектральной кривой в районе «красного сдвига» REIP; 4) простой вегетационный индекс RVI; 5) трансформированный вегетационный индекс с учетом влияния почвы TSAVI [20, 21]. Это позволило повысить вес определенных спектральных каналов и тем самым достигнуть очень высокой достоверности классификации (90 %).

Вероятность наличия погруженных в воду видов, не распознанных по снимку Sentinel-2/MSI, была оценена по косвенным дешифровочным признакам. Погруженные растения восприимчивы к мутности воды, которая, в свою очередь, коррелирует со скоростью потока. Для учета этой особенности была составлена карта режимов мутности воды в дельте. Для каждого пикселя снимков Landsat с 1989 по 2015 г. было рассчитано среднее арифметическое значение концентрации взвеси в воде, после чего все значения были разделены на три класса: 1) акватории с постоянно низкой мутностью воды (<5 мг/л в изучаемый период); 2) акватории с периодически высокой мутностью в многоводные периоды (5–10 мг/л); 3) акватории с постоянно высокой мутностью воды (>10 мг/л). Такие градации были применены в соответствии с пространственным распределением многолетней динамики мутности воды. В 1-м классе представлены малопроточные озера и небольшие протоки, во 2-м — проточные озера и средние протоки, в 3-м — крупные протоки и области повышенной турбулентности воды. Соответственно, в акваториях 1-го класса погруженные растения имеют высокую вероятность произрастания, что подтверждается полевыми данными, так как здесь присутствуют все условия их комфортного обитания. Однако мы не можем их увидеть по прямым дешифровочным признакам из-

за значительной глубины погружения. По тому же принципу акватории 2-го и 3-го классов имеют соответственно низкую и очень низкую вероятность наличия погруженных видов.

На основе полученной информации подготовлена карта водной растительности дельты, учитывающая как уверенно распознанные по снимку Sentinel-2/MSI выделы, так и места наиболее вероятного наличия погруженных растений. Значения площадей по указанной карте получились следующие: 1) растительность с плавающими листьями — 59 км², 2) погруженные растения — 31 км², 3) акватории с высокой вероятностью местообитания погруженных растений — 13 км².

При подстановке полученных значений в уравнение (10) получена характеристика количества *Me*, которое могут накопить макрофиты за вегетационный период. Учитывая, что вегетационный период растительности южного Байкала длится в среднем 110 дней и начинается в конце мая [22], количество накопленных металлов в водной растительности ($\Delta M_{вр}$, кг) ко дню изучения может быть определено по формуле

$$\Delta M_{вр} = (mM_1 + mM_2) \cdot d / 110, \quad (12)$$

где в нашем случае d — количество дней, прошедших с начала периода вегетации до изучаемого периода, а mM_1 и mM_2 — максимально возможное накопление элемента в каждой из групп водной растительности.

Интегральная методика оценки баланса металлов. Полученные данные о концентрации четырех *Me* во взвеси и водных растениях интегрированы в модель оценки баланса металлов. Общий баланс металлов (ΔM_a) представлен аналогично балансу взвешенных наносов как разность между объемом поступивших в дельту (M_b) и прошедших через нее транзитом (M_t) *Me*, а также как сумма отдельных составляющих баланса, таких как баланс в пределах основных протоков (ΔM_p), периодически затопляемых пойменных массивов ($\Delta M_{п}$) и накопление *Me* водными растениями ($\Delta M_{вр}$):

$$\Delta M_a = M_b - M_t = \Delta M_p + \Delta M_{п} + \Delta M_{вр}. \quad (13)$$

Объем приходящего в дельту потока каждого металла (M_b , кг/сут) рассчитывается исходя из объема стока взвешенных частиц в вершине дельты (W_b , кг/с), а объем стока каждого металла на выходе из дельты (M_t , кг/сут) через сток взвешенных наносов по озерному краю (W_t , кг/с):

$$M_b = M_s \cdot W_b \cdot 86\,400 \cdot 10^{-6}; \quad (14)$$

$$M_t = M_s \cdot W_t \cdot 86\,400 \cdot 10^{-6}. \quad (15)$$

Общий баланс (ΔM_a , кг/сут) каждого металла рассчитывается вычитанием из общего потока металлов, поступившего в вершину дельты (M_b , кг/сут), объема металлов, проходящего через озерный край дельты (M_t); а баланс в пределах русловой части (ΔM_p) высчитывается по балансу стока взвешенных частиц в руслах (ΔW_p , кг/с):

$$\Delta M_a = M_b - M_t; \quad (16)$$

$$\Delta M_p = M_s \cdot \Delta W_p \cdot 86\,400 \cdot 10^{-6}. \quad (17)$$

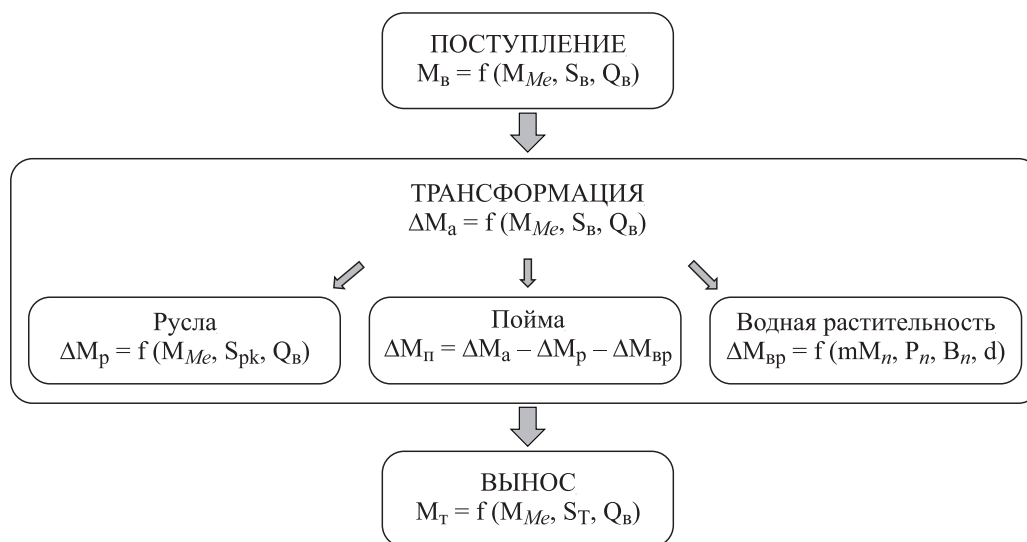


Рис. 2. Концептуальная схема интегральной модели оценки баланса металлов в дельте р. Селенги.

Чтобы узнать долю, которая приходится на баланс в пойме и водной растительности ($\Delta M_{п+вр}$, кг/сут), необходимо вычесть из общего объема аккумулированных Me (ΔM_a) русловую составляющую (ΔM_p). В свою очередь доля поймы ($\Delta M_{п+вр}$, кг/сут) определяется как разность между $\Delta M_{п+вр}$ и $\Delta M_{вр}$, рассчитанной по формуле (11).

Аналогично общему балансу, на основе опубликованных данных о распределении расходов воды по дельтовым протокам [6] был рассчитан баланс Me по каждому сектору дельты. Концептуальная схема методики представлена на рис. 2. Сводная информация о параметрах модели приведена в таблице.

Параметры, необходимые для расчета интегральной модели оценки баланса металлов в дельте р. Селенги

Параметр	Ед. изм.	Описание	Источник /формула расчета
Этап I. Расчет баланса наносов и металлов во взвеси. Входные параметры:			
Q_v	м ³ /с	Расход воды в вершине дельты	Открытые данные по гидропосту Мостовой
S_v	мг/л	Концентрация взвеси в вершине	Результаты моделирования по космическим снимкам
S_T	—"	Концентрация взвеси по озерному краю	
S_{pk}	—"	Концентрации взвеси в устьях модельных протоков k	
ΔS_{pk}	—"	Продольные изменения концентраций взвеси в протоках k	$\Delta S_{pk} = S_v - S_{pk}$
ΔS_p	—"	Среднее значение баланса взвеси по профилям ротов k	$\Delta S_p = (S_{p1} + S_{p2} + \dots + S_{pk})/k$
M_{Me}	мкг/л	Концентрация металлов во взвеси	Модельные данные
Этап I. Расчет баланса наносов и металлов во взвеси. Выходные параметры:			
ΔW_a	т/сут	Общий баланс взвешенных наносов	Формула (1), этап I
W_v	—"	Сток взвешенных наносов в вершине дельты	Формула (2), этап I
W_T	—"	Сток взвешенных наносов по озерному краю дельты	Формула (3), этап I
ΔW_p	—"	Баланс взвешенных наносов в пределах руслового сегмента	Формула (4), этап I
$\Delta W_{п+вр}$	—"	Баланс наносов в пределах поймы и в водных растениях	Формула (5), этап I
M_s	мкг/г	Концентрация Me во взвеси	Формула (10), этап I
Этап II. Оценка накопления металлов в водной растительности дельты. Входные параметры:			
C_{nMe}	мг/кг	Средняя концентрация элемента в группе n водной растительности в конце вегетационного периода	На основе полевых и лабораторных данных
B_n	кг/м ²	Средняя фитомасса растений группы n	
P_n	м ²	Площадь распространения группы n в дельте	На основе полевых данных и дешифрирования макрофитов
d	сут	Количество дней, прошедших с начала периода вегетации до отбора	На основе полевых данных
Этап II. Оценка накопления металлов в водной растительности дельты. Выходные параметры:			
mM_n	кг	Максимально возможное накопление элемента в группе n водной растительности	Формула (11), этап II
$\Delta M_{вр}$	кг	Количество накопленных металлов в водной растительности за один день вегетации	Формула (12), этап II
Этап III. Интегральная методика оценки баланса металлов. Входные параметры:			
M_{Me}	мкг/л	Концентрация каждого металла в воде	Модельные данные
S	мг/л	Концентрация взвеси	Результаты моделирования по космическим снимкам
W_v	т/сут	Сток взвешенных наносов в вершине дельты	Расчеты этапа I
W_T	—"	Сток взвешенных наносов по озерному краю дельты	Расчеты этапа I
ΔW_p	—"	Баланс взвешенных наносов в пределах руслового сегмента	Расчеты этапа I
$\Delta M_{вр}$	кг	Количество накопленных в макрофитах Me за 1 сут	Расчеты этапа II
Этап III. Интегральная методика оценки баланса металлов. Выходные параметры:			
M_v	кг/сут	Объем приходящего в дельту потока каждого Me	Формула (14), этап III
M_T	—"	Объем стока каждого Me на выходе из дельты	Формула (15), этап III
ΔM_a	—"	Общий баланс каждого Me	Формула (16), этап III
ΔM_p	—"	Баланс каждого Me в пределах руслового сегмента	Формула (17), этап III
$\Delta M_{п+вр}$	—"	Баланс каждого Me в пойме и водной растительности	$\Delta M_{п+вр} = \Delta M_a - \Delta M_p$
$\Delta M_{п+вр}$	—"	Баланс каждого Me в пойме	$\Delta M_{п+вр} = \Delta M_{п+вр} - \Delta M_{вр}$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При расчете баланса наносов рассматривались три варианта соотношения между выходящими (W_T) и входящими (W_B) потоками: $W_T > W_B$, $W_T < W_B$ и $W_T \approx W_B$, которые указывают на положительный (преобладание эрозии), отрицательный (преобладание аккумуляции) и равновесный баланс взвешенных наносов соответственно.

По результатам анализа 45 случаев, рассчитанных по снимкам Landsat с 1989 по 2015 г., показано, что в пределах дельты при повышенных расходах воды р. Селенги (более 1500 м³/с) преобладает аккумуляция взвешенного материала (в среднем 30 % от общего стока наносов в вершине дельты), определяемая русловой аккумуляцией (15 %) и осаждением материала в пределах затопленных участков поймы, небольших протоках и озерах нижней части дельты (15 %). При пониженных расходах воды (менее 1500 м³/с) встречаются случаи продольного увеличения стока взвешенных наносов, связанные с нагонами со стороны Байкала и русловой эрозией в рукавах.

Чтобы проследить связь процессов эрозии и аккумуляции в дельте от расхода воды, по космическим снимкам была оценена динамика затопляемости пойменных массивов. По 20 снимкам серии Landsat, снятым при расходах воды от 640 до 4750 м³/с, была рассчитана зависимость площади затопления дельты от расходов воды. Выяснилось, что протоки сохраняют свои берега при расходе примерно до 1500 м³/с, при больших расходах речные воды затопляют пойму. Это подтверждает гипотезу о значительном влиянии пойменных массивов на аккумуляцию вещества при высоких значениях расходов воды.

Прослеживается также четкая временная динамика средних значений балансов для каждого из секторов дельты в течение года, аппроксимируемая зависимостью

$$\Delta S = 10^{-6} \cdot Q^2 - 0,091 \cdot Q + 4,654. \quad (18)$$

Анализ баланса взвешенных наносов показывает, что весной в дельте преобладают эрозионные процессы, летом практически всегда превалирует аккумуляция, а осенью эрозионные процессы активизируются снова. Отмеченные сезонные эффекты изменения баланса взвешенных наносов, скорее всего, связаны с затоплением прирусловой поймы и осередков, что способствует аккумуляции наносов на их поверхности из-за изменения коэффициентов шероховатости. Летом поймы и осередки чаще всего покрыты травянистой растительностью, которая удерживает взвешенные наносы. Другой возможной причиной сезонных изменений баланса взвешенных наносов в пределах русловой части дельты является вегетационная активность растительности. В период вегетации макрофитов наблюдается значительный перенос мелкодисперсных фракций взвеси с отмирающей водной растительностью. Помимо этого, весной с ростом расходов после зимней межени активизируются процессы размыва берегов на фоне оттаивания грунта, тем самым снижается устойчивость береговых откосов к размыву. Дополнительно льдины также способствуют росту темпов разрушения берегов, что повышает концентрацию взвеси в воде.

Для апробации методики оценки баланса Me в дельте р. Селенги был выбран снимок Landsat-8/OLI (21 июля 2014 г.). В 2014 г., что в целом свойственно для устьевой области Селенги, отмечались незначительные колебания расходов воды в дельте на протяжении всего теплого сезона, поэтому определить конкретную фазу водного режима на момент съемки затруднительно.

Результаты моделирования можно проиллюстрировать с помощью карт баланса металлов по секторам дельты р. Селенги (рис. 3). Полученные данные свидетельствуют о том, что в среднем 43 % приходящего в дельту потока исследуемых металлов (Mg, Al, Ti, Tl) накапливается в дельте, из него 73 % приходится на русловую составляющую, 23 % на пойменную и 3 % на долю водной растительности. Подобные оценки согласуются с характеристикой устьевых областей как «ловушек» для взвешенных и растворенных веществ на пути в приемный водоем, выполняющих функции геохимических барьерных зон [3] или маргинальных фильтров [4, 23]. В то же время проведенное исследование впервые позволяет предложить оценки дискретных процессов осадконакопления.

При этом следует учесть, что развитие предложенной модели требует расширения базы данных о содержании металлов в разных компонентах аквальных ландшафтов дельты и их сезонной изменчивости. Целый ряд допущений (узкая временная специализация модели, привязанная к датам наземной съемки и спутникового снимка; погрешности используемых регрессионных моделей) существенно ограничивает ее применимость. Исследования должны охватывать разные фазы водного режима (паводок, половодье, межень) и разную водность реки (годы как с большими расходами воды, так и с малыми). Это позволит адаптировать модель под различные особенности движения стока, а также должно снизить погрешности определения концентраций металлов в зависимости от содержания взвеси в воде.

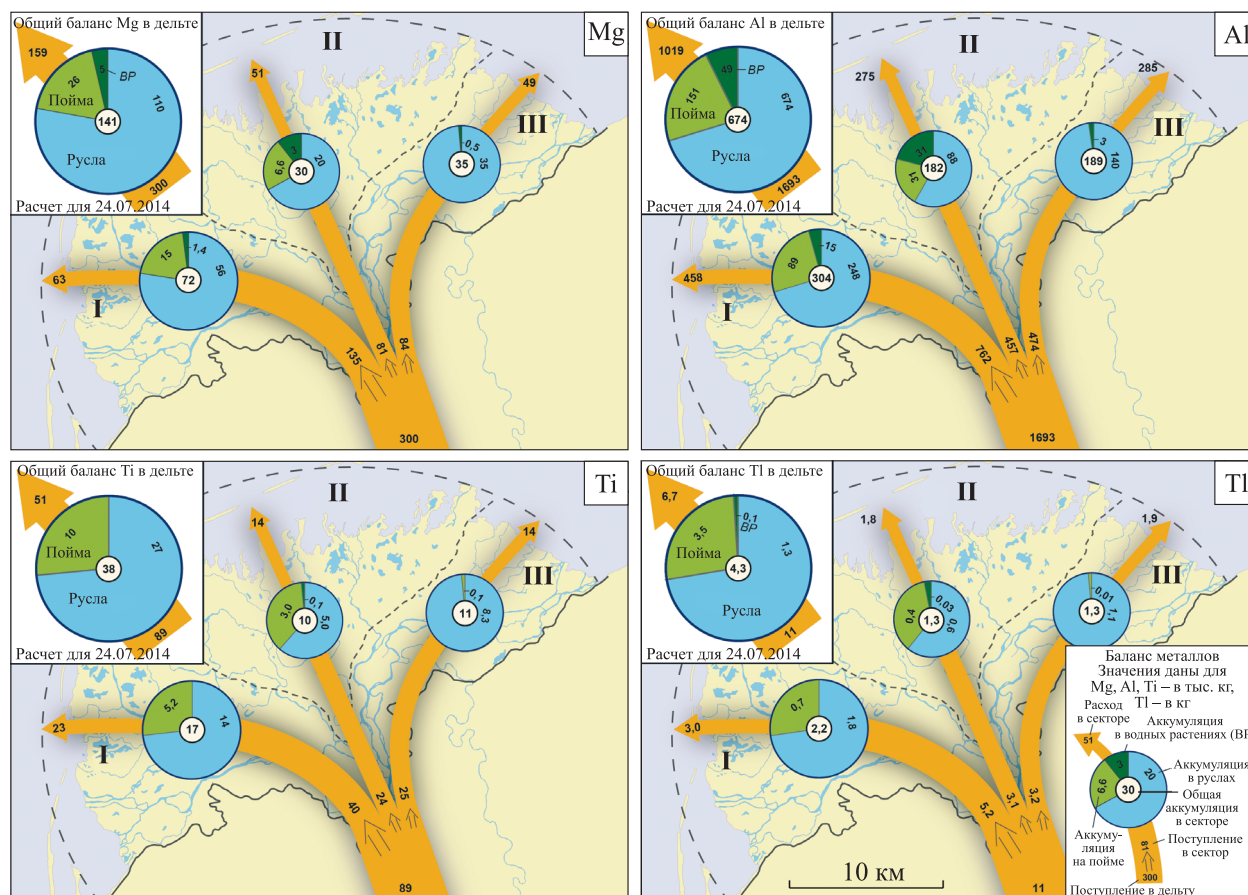


Рис. 3. Баланс Mg, Al, Ti, Tl, рассчитанный для даты 24.07.2014, м-б 1:300 000.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дистанционные методы могут эффективно применяться для изучения эрозионно-аккумулятивных процессов, происходящих в дельте р. Селенги. Карты, составленные на основе моделирования по данным дистанционного зондирования, позволяют получить количественные характеристики явлений, которые в полевых условиях посчитать крайне сложно или даже невозможно: баланса взвешенных наносов и металлов, доли отдельных компонентов в этом балансе, в том числе биофильтрующую функцию водной растительности.

Расчет баланса наносов позволил впервые получить количественные данные о взаимосвязи эрозионно-аккумулятивных процессов с расходом воды в дельте р. Селенги. Было показано, что при расходах воды более 1500 м³/с всегда преобладает аккумуляция наносов в дельте, что связано с затоплением поймы при выходе воды из русел проток. По полученным данным, в дельте в среднем аккумулируется около 30 % взвешенных наносов, при этом из рассмотренных ситуаций с 1989 г. аккумуляция преобладала в 80 % случаев.

Разработанная методика интегральной оценки баланса металлов имеет высокий потенциал применения, поскольку входными параметрами для расчета являются только космические снимки и информация о расходах воды и концентрации металлов во взвеси в одной точке — вершине дельты.

Исследование осуществлено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Полевые работы выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-05-80094 и 19-05-50109) и при частичной финансовой поддержке Российского географического общества в рамках проекта «Байкальская экспедиция».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. — М.: Высш. шк., 1966. — 392 с.
2. Woo M.K. Boundary and border considerations in hydrology // *Hydrological Processes*. — 2004. — N 18. — P. 1185–1194.
3. Глазовская М.А. Геохимические барьеры в почвах: типология, функциональные особенности и экологическое значение // *Геохимия ландшафтов и география почв*. — 2012. — № 100. — С. 26–44.
4. Лисицын А.П., Демина Л.Л., Гордеев В.В. Геохимический барьер река — море и его роль в осадочном процессе // *Биогеохимия океана*. — М.: Наука, 1983. — С. 32–48.
5. Chalov S., Thorslund J., Kasimov N., Aybullaev D., Ilyicheva E., Karthe D., Kositsky A., Lychagin M., Nitttrouer 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. — Vol. 17, N 7. — P. 1–15.
6. 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. — Vol. 375. — P. 19–22.
7. **Эколого-географический атлас-монография «Селенга — Байкал»** / Под ред. Н.С. Касимова. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2019. — 288 с.
8. Shinkareva G.L., Lychagin M.Yu., Tarasov M.K., Pietron J., Chichayeva M.A., Chalov S.R. Biogeochemical specialization of macrophytes and their role as a biofilter in the Selenga Delta // *Geography, Environment, Sustainability*. — 2019. — Vol. 12, issue 3. — P. 240–263.
9. Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., Kosheleva N., Chalov S., Pashkina M., Thorslund J., Jarsjö J. River Water Quality of the Selenga-Baikal Basin. Part 1: Spatio-Temporal Patterns of Dissolved and Suspended Metals // *Water*. — 2020. — Vol. 12, issue 8. — P. 2137.
10. Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., Chalov S., Pashkina M., Thorslund J., Jarsjö J. River Water Quality of the Selenga-Baikal Basin. Part 2: Metal Partitioning under Different Hydroclimatic Conditions // *Water*. — 2020. — Vol. 12, issue 9. — P. 2392.
11. Chalov S.R., Jarsjö J., Kasimov N., Romanchenko A., Pietron J., Thorslund J., Belozeroва E. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia // *Environmental Earth Sciences*. — 2015. — Vol. 73. — P. 663–680.
12. Ильичёва Е.И., Корытный Л.М., Павлов М.В. Руслонная сеть дельты р. Селенги на современном этапе // *Вестн. Том. ун-та*. — 2014. — № 380. — С. 190–194.
13. Пинегин А.В., Рогозин А.А., Лещиков Ф.Н., Кулиш Л.Я., Якимов А.А. Динамика берегов озера Байкал при новом уровненом режиме. — М.: Наука, 1976. — 88 с.
14. 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. — Т. 44, № 3. — С. 1–8.
15. 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.
16. 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.
17. Bouchez J., Métivier F., Lupker M., Maurice L., Perez M., Gaillardet J., France-Lanord C. Prediction of depth-integrated fluxes of suspended sediment in the Amazon River: Particle aggregation as a complicating factor // *Hydrological Processes*. — 2011. — Vol. 25, N 5. — P. 778–794.
18. Lupker M., France-Lanord C., Lavé J., Bouchez J., Galy V., Métivier F., Gaillardet J., Lartiges B., Mugnier J.L. Rouse-based method to integrate the chemical composition of river sediments: Application to the Ganga basin // *Journ. of Geophysical Research: Earth Surface*. — 2011. — Т. 116, vol. F04012. — P. 1–24.
19. Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. — М.: Геос, 2006. — 175 с.
20. Index DataBase [Электронный ресурс]. — <https://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=169> (дата обращения 29.10.2020).
21. Index DataBase [Электронный ресурс]. — https://www.indexdatabase.de/db/is.php?sensor_id=96 (дата обращения 29.10.2020).
22. Чепинога В.В. Флора и растительность водоемов Байкальской Сибири. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015. — 468 с.
23. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. — 1994. — № 34 (5). — С. 735–747.

Поступила в редакцию 16.06.2020

После доработки 13.01.2021

Принята к публикации 25.03.2021