

УДК 556.314.6(282.256.1)

ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ЗАБОЛАЧИВАНИИ ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ

Савичев Олег Геннадьевич,
OSavichev@mail.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность определяется необходимостью понимания механизмов взаимодействия подземных, болотных и речных вод в условиях сильной заболоченности в таежной зоне Западной Сибири для решения целого ряда научных и инженерных задач как в настоящее время, так и в перспективе.

Цель: количественная оценка изменения уровней подземных (грунтовых) вод в характерные периоды заболачивания юго-востока Западно-Сибирской равнины: 1) начало интенсивного распространения торфяных болот с мощностью торфяной залежи 0,3 м и более; 2) масштабная олиготрофизация болот.

Методы: методы математического моделирования, статистические методы.

Результаты и выводы. Проведен анализ структуры торфяной залежи в южной части водосбора реки Чая (приток реки Обь). Показано, что масштабное формирование торфяных болот (с мощностью торфа 0,3 м и более) на рассматриваемой территории происходило примерно 4 тыс. лет назад, а олиготрофизация торфяной залежи (в региональном масштабе) – примерно 2,0...1,5 тыс. лет назад. В обоих случаях основная часть болот, предположительно, могла быть отнесена к низинному типу, но, по сравнению с современным периодом, в первом случае их общая площадь была меньше в 2 раза, а во втором – больше в 1,7 раза. С учетом этих оценок определены средние значения инфильтрации Inf и коэффициентов фильтрации K_f , получена зависимость отношения Inf/K_f от площади низинных болот и выполнены расчеты уровней подземных (грунтовых) вод в настоящее время и для сроков 1,7 и 4,1 тыс. лет назад. Показано, что при олиготрофизации торфяной залежи (примерно 2,0...1,5 тыс. лет назад) с высокой вероятностью ухудшился водообмен между болотами и подземными водоносными горизонтами и выросли уровни подземных вод. Начало интенсивного регионального заболачивания (около 4 тыс. лет назад) происходило на фоне интенсивных водно-эрозионных процессов, в результате которых отмечено накопление речного аллювия, сопровождающееся подъемом уровней речных, а затем и подземных вод.

Ключевые слова:

подземные, болотные и речные воды, юго-восток Западно-Сибирской равнины, отношение инфильтрации к коэффициенту фильтрации, уровенный режим подземных вод.

Введение

Западно-Сибирская равнина характеризуется очень высокой заболоченностью, которая возрастает и в настоящее время [1–8]. По оценкам некоторых авторов [9, 10], вертикальный прирост торфяной залежи в таежной зоне составляет в среднем до 0,8 мм/год. Соответственно, можно ожидать изменения состояния остальных компонентов окружающей среды, так или иначе связанных с болотными экосистемами, в том числе и подземных вод. При этом очевидна взаимосвязь между процессами формирования режима подземных вод и болотных экосистем (далее будет использоваться термин «болотные процессы», подразумевающий комплекс взаимосвязанных событий возникновения, эволюции и деградации болот).

Этой проблемой в разное время и на примере разных регионов мира занимались многие исследователи, которым удалось получить ряд важных результатов в области гидрогеохимии, гидрогеодинамики и болотной гидрологии [11–17]. Но все же остались недостаточно раскрытыми вопросы взаимодействия подземных и болотных вод [10, 17–23]. В том числе, до сих пор не совсем понятны направленность и механизм пространственно-временных изменений фильтрационных свойств пограничных слоев болот, геомиграционных потоков и элементов водного и геохимического балансов в процессе эволюции болот, что и

определило тематику соответствующих исследований в Томском политехническом университете в последние два десятилетия [17, 22, 24]. Ниже рассмотрены результаты одного из этапов этих исследований, выполненного с целью реконструкции гидрогеологических условий в восточной части современного Васюганского болота (в географическом отношении – на юго-востоке Западно-Сибирской равнины, в левобережной части бассейна реки Оби на участке ее среднего течения, в административном отношении – в южной части Томской области) и их сопоставления с этапами болотных процессов.

Объекты и методика исследования

Общая идея исследования основана на использовании взаимосвязей между режимом подземных и поверхностных вод [25, 26] и заключается: 1) в построении кривой поверхности грунтовых вод по нормали к направлению регионального подземного стока на участках с различной степенью и характером заболоченности; 2) выявлении связей между гидрогеологическими параметрами и характеристиками болотных процессов; 3) восстановлении с помощью этих зависимостей горизонта подземных вод в верхней части гидрогеологического разреза при смене ключевых этапов болотного процесса в Западной Сибири (безнапорных и слабонапорных вод преимущественно в четвертичных отложениях либо в гидравлически свя-

занных отложениях четвертичного, неогенового и палеогенового возрастов, соответствующих по условиям залегания категории «грунтовые воды»).

С учётом этого был намечен профиль с запада-северо-запада на восток-юго-восток, пересекающий южную часть водосбора р. Чаи (левый приток р. Оби), включая ее притоки – рр. Андарма, Галка, Тетеренка, Бакчар и Икса, водосбор р. Шегарка (левый приток р. Оби), и примыкающий к р. Обь у с. Мельниково и п. Победа (рис. 1, табл. 1). В левобережной части долины р. Оби расположено низинное (по водно-минеральному питанию евтрофное) Обское болото длиной немного более 100 км и шириной до 7 км со средней толщиной торфяной залежи около 4,5 м [19, 24]. Основная часть профиля пересекает отроги Васюганского болота, точнее Васюганского болотного

комплекса, продолжающего расширяться за счет слияния отдельных верховых (по водно-минеральному питанию олиготрофных), переходных (мезотрофных) и низинных (евтрофных) болот (первый, он же основной, сценарий заболачивания предполагает формирование большого количества водоемов после деградации последнего оледенения в Сибири с последующей их евтрофизацией, образованием низинных, а затем переходных и верховых болот [2–5, 9, 10, 21]), а также «наползания» верхового болота (с окрайкой в виде низинных и переходных болот) непосредственно на залесенные суходолы (второй сценарий заболачивания; один из возможных механизмов такого «наползания» в восточной части Васюганского болота за счет разницы в проточности лесных и болотных экосистем описан в [27] на основе результатов [11, 16]).

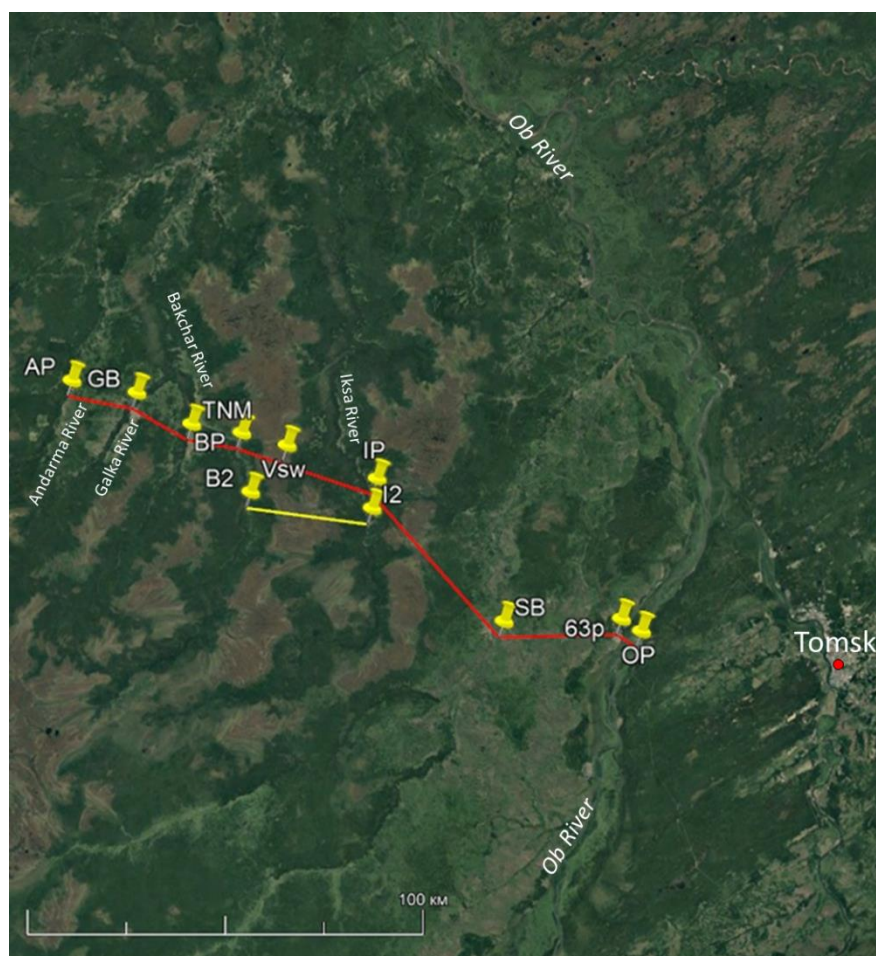


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений (табл. 1); основной расчетный профиль AP–OP проходит через посты: AP – р. Андарма у с. Панычево; GB – р. Галка у с. Бакчар; TNM – р. Тетеренка у урочища Ново-Макаровка; BP – р. Бакчар у с. Полныянка; Vsw – участок гидрогеохимических наблюдений ТПУ на Васюганском болоте; IP – р. Икса у с. Плотниково; SB – р. Шегарка у с. Боборыкино; 63p – гидрогеологическая скважина в с. Мельниково; OP – р. Обь у п. Победа; вспомогательный профиль B2–I2 (рис. 2) проходит через створы на р. Бакчар (B2) и Икса (I2); гидрогеохимические наблюдения на Обском болоте проводятся на участке 63p–OP (снимок Google Earth)

Fig. 1. Scheme of location of observation points (table 1); the main design profile AP–OP passes through the posts: AP is the Andarma river at Panychevo; GB is the Galka river at Bakchar; TNM is the Teterenka river at Novo-Makarovka; BP is the Bakchar river at Polnyanka; Vsw is site of hydrogeochemical observations of TPU in the Vasyugan bog; IP is the Iksa river at Plotnikovo; SB is the Shegarka river at Boborykino; 63p is the hydrogeological well at Melnikov; OP is the Ob river at Pobeda; auxiliary profile B2–I2 (Fig. 2) passes through the alignments on the Bakchar (B2) and Iksa (I2) rivers; hydrogeochemical observations in the Ob swamp are carried out at the site 63p–OP (image from Google Earth)

Таблица 1. Морфометрические характеристики рек в пределах основного и дополнительного профилей (рис. 1)

Table 1. Morphometric characteristics of rivers within the main and extra profiles (Fig. 1)

№ рис. 1 Fig. 1 no.	Река/River	Пункт/Locality	Период наблюдений Observation period		L_q , км/км	F_b , км ² /км ²	f_m f_{sw} f_{e-sw} f_{m-sw} f_{o-sw}					
			от/from	до/till			%					
OP	Обь/Ob	Победа/Pobeda	1965	действ./valid	928*	264000	—	—	—	—	—	—
SB	Шегарка/Shegarka	Бабарыкино/Babarykino	1933		205	8190	25	25	11	12	2	—
IP	Икса/Iksa	Плотниково/Plotnikovo	1933		154	2560	49	63	5	35	23	—
I2		—	—	—	—	2360	—	—	—	—	—	—
BP	Бакчар/Bakchar	Полынянка/Polynnyanka	1974	действ./valid	144	2040	40	70	4	50	16	—
B2		—	—	—	—	1960	—	—	—	—	—	—
TNM	Тетеренка/Teterenka	Ново-Макаровка (нежилое) Novo-Makarovka (non-residential)	1965	1966	111	1470	—	56	4	36	16	—
GB	Галка/Galka	Бакчар/Bakchar	(1956) 1981	1997	119	1190	—	42	2	23	17	—
AP	Андарма/Andarma	Панычево/Panychevo	1950	действ./valid	140	2330	—	52	4	35	13	—
—	Чая/Chaya	Подгорное/Podgornoe	1933		58*	25000	35	—	—	—	—	—
—	Чузик/Chuzik	Пудино/Pudino	1978		150	7090	35	—	—	—	—	—

Примечание: номер объекта соответствует рис. 1; L_q – длина реки от истока [31]; F_b – площадь водосбора [31]; f_m – заболоченность (доля болот, выделенных по топографическим картам с учетом выделенных контуров болот, в площади водосбора) по данным [31]; по материалам дешифрирования космоснимков [32]; f_{sw} – доля болот всех типов и заболоченных земель; f_{e-sw} – доля болот низинного типа и заболоченных земель; f_{m-sw} – доля болот переходного типа; f_{o-sw} – доля болот верхового типа; прочерк означает отсутствие данных; * – длина от слияния притоков (для Оби – реки Бия и Катунь; для Чаи – реки Парбиг и Бакчар).

Note: object number corresponds to Fig. 1; L_q is the length of the river from the source [31]; F_b is the catchment area [31]; f_m is the swampiness (the proportion of swamps identified by topographic maps, taking into account the distinguished contours of swamps, in the catchment area) according to [31]; according to satellite image interpretation [32]; f_{sw} is the proportion of all types of swamps and wetlands; f_{e-sw} is the proportion of low-moor peat swamps and swampy lands; f_{m-sw} is the proportion of transition-moor peat swamps; f_{o-sw} is the proportion of high-moor peat swamps; a dash means no data; * length from the confluence of tributaries (for the Ob are the Biya and Katun rivers; for the Chaya are the Parbig and Bakchar rivers).

В первом случае (возможно, и во втором) в процессе трансформации низинного болота в переходное и верховое формируется переходный слой между минеральными грунтами и торфами, характеризующийся существенным снижением фильтрационных свойств, что может приводить к резкому снижению интенсивности массообмена между торфяной залежью и подземными водами [22]. Но в условиях низинных болот, особенно в долинах крупных рек, этот обмен в целом сохраняется [19, 24], что и определяет взаимное влияние подземных и болотных вод. Соответственно, ключевые этапы болотного процесса на рассматриваемой территории должны соответствовать: 1) началу интенсивного болотообразования, когда сформировалась торфяная залежь мощностью 0,3 м и более (согласно [28, 29], природное образование, занимающее часть земной поверхности и представляющее собой отложения торфа мощностью 0,3 м и более, насыщенное водой и покрытое специфической растительностью, рассматривается как торфяное болото, а при мощности менее 0,3 м – как заболоченные земли; практический смысл принятия мощности 0,3 м заключается и в том, что для анализа гидрогеологических условий используются данные по существенно заболоченным водосборам с явно выраженными торфяными болотами, а корректность экстраполяции полученных для современных условий зависимостей на период с нулевой заболоченностью в общем случае вызывает сильные сомнения); 2) периоду времени, когда в структуре торфяной залежи повсеместно появляются торфа переходного и верхового типов.

Для ориентировочной идентификации указанных слоев были использованы данные геологоразведоч-

ных работ на торф и научных исследований, в том числе с участием сотрудников ТПУ [1, 18, 22, 30]. Один из изученных разрезов, расположенный вблизи от основного профиля, приведен на рис. 2.

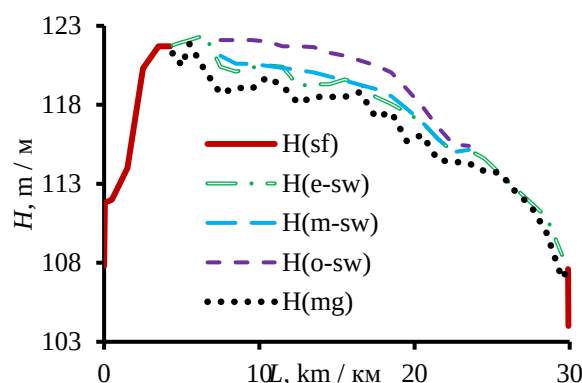


Рис. 2. Схематичный разрез Васюганского болота в междуречье рек Бакчар и Икса по профилю B2–I2 (рис. 1); высотные отметки (в метрах Балтийской системы высот) поверхности: $H(sf)$ – незаболоченных участков водосбора; $H(e-sw)$ – низинной торфяной залежи; $H(m-sw)$ – переходной торфяной залежи; $H(o-sw)$ – верховой торфяной залежи; $H(mg)$ – минеральных грунтов под болотом

Fig. 2. Schematic section of the Vasyugan swamp in the interfluvium of the Bakchar and Iksa rivers along the B2–I2 profile (Fig. 1); elevation marks (in meters of the Baltic height system) of the surface: $H(sf)$ is the non-swamped areas of the basin; $H(e-sw)$ is the low-moor peat deposit; $H(m-sw)$ is the transition-moor peat deposit; $H(o-sw)$ is the high-moor peat deposit; $H(mg)$ is the mineral ground under the swamp

Для оценки общей заболоченности водосборов использовались опубликованные данные Росгидромета [31] и материалы дешифрирования космоснимков [30, 32]. Между ними есть определенная разница, обусловленная использованием: 1) в первом случае топографических карт по состоянию на 1960-е гг. и ранее, а во втором – более современных космоснимков; 2) нескольких разных подходов к определению границ (в первом случае не учитывались болота размером до 0,5 км², пойменные болота и иные болота, не оконтуренные на топографических картах [33], во втором случае была выполнена идентификация болотной растительности по космоснимкам [32], что, предположительно, позволяет более точно учесть площадь низинных болот). С учетом указанных особенностей при анализе гидрогеологических условий использовались данные дешифрирования космоснимков.

Основной профиль проходит через ряд действующих (р. Андарма у с. Панычево, р. Бакчар у с. Полянника, р. Икса у с. Плотниково, р. Шегарка у с. Боборыкино, р. Обь у п. Победа) или закрытых в настоящее время (р. Галка у с. Бакчар, р. Тетеренка у заброшенной деревни Ново-Макаровка) гидрологических постов, а также режимную гидрогеологическую скважину 63р в с. Мельниково и пункты гидрогеохимических наблюдений на участке Васюганского болота между селами Плотниково и Полянника и на Обском болоте у сел Мельниково и Нашеково (рис. 1, табл. 1). Описание постов Росгидромета приведено в [31], участков болотных наблюдений – в [10, 22, 24, 34], скважины 63р – в [35], общая гидрогеологическая характеристика дана в [36–39], характеристика природных условий в целом и их изменений в кайнозой – в [4, 5, 40, 41]. Дополнительно в табл. 1 приведены сведения о р. Чае, к водосбору которой относятся реки Андарма, Галка, Тетеренка, Бакчар, Икса, а также о р. Чузик – одним из двух притоков р. Парабель, водосбор которой примыкает к водосбору р. Чаи на северо-западе. Ранее Ю.А. Моисеевой [42] была проведена ориентировочная реконструкция подземного стока в водосборе р. Чузик в голоцене, результаты которой также учитывались в рассматриваемом исследовании.

По материалам указанных постов были определены среднееголетние уровни и расходы воды согласно [43] с приведением к периоду с 1967 по 2005 гг. по рекам-аналогам (наиболее длинные ряды для р. Шегарки у с. Боборыкино и Иксы у с. Плотниково). Полученные значения использовались для расчета поверхности грунтовых вод при допущениях: 1) движение грунтовых вод между реками p_1 и p_2 в среднем за месячные интервалы рассматривается как условно стационарный процесс; 2) этот процесс описывается уравнением Дюпюи (1), а коэффициенты фильтрации K_f и инфильтрации Inf в каждой точке расчетного профиля близки к соответствующим средним значениям [20, 26]:

$$H_{gr,x} = \sqrt{H_{r,1}^2 - \frac{H_{r,1}^2 - H_{r,2}^2}{L_{12}} \cdot x + \frac{Inf}{K_f} \cdot (L_{12} - x) \cdot x}, \quad (1)$$

где $H_{r,1}$ и $H_{r,2}$ – уровни воды смежных рек p_1 и p_2 ; $H_{gr,x}$ – уровень подземных вод на расстоянии x от уреза реки p_1 ; L_{12} – расстояние между урезами рек p_1 и p_2 ; K_f – средний по профилю коэффициент фильтрации; Inf – средняя по профилю инфильтрация, принимаемая в среднем за многолетний период ориентировочно равной подземной составляющей речного стока, которая, в свою очередь, оценивается как среднее взвешенное из модулей годового подземного стока смежных рек M_1 и M_2 (2)–(4):

$$Inf \approx K_a \cdot \left(M_1 \cdot \frac{x}{L_{12}} + M_2 \cdot \frac{L_{12}-x}{L_{12}} \right). \quad (2)$$

$$M_j = \frac{\sum_{k=1}^{12} M_{j,k}}{12}, \quad (3)$$

$$M_{j,k} = \begin{cases} M_{j,k}, & k = 1, 2, 3, 12 \\ M_{j,3} + (M_{j,12} - M_{j,3}) \cdot \frac{k-3}{12-3}, & k > 3, k < 12 \end{cases} \quad (4)$$

где k – номер месяца календарного года; $k = 1, 2, 3, 12$ (декабрь–март) – период зимней межени, когда речной сток определяется в основном притоком подземных вод; j – номер реки; K_a – коэффициент размерности.

Тогда коэффициент фильтрации K_f может быть найден из уравнений (5), (6) по известным значениям уровней воды в смежных реках p_1 и p_2 при условии минимума функции (7):

$$K_f = \frac{Inf}{K_f} = \frac{H_1^2 - H_2^2}{(L_{12} - x) \cdot x} + \frac{H_1^2 - H_2^2}{(L_{12} - x) \cdot L_{12}}, \quad (5)$$

$$K_f = \frac{Inf}{K_f}, \quad (6)$$

$$K_r = \frac{100 \cdot |\min(H_{sf,i} - H_{gr,i}) - \Delta|}{\Delta} \rightarrow 0, \quad (7)$$

где Δ – минимальная глубина грунтовых вод в междуречье p_1 – p_2 ; i – номер расчетной точки между реками p_1 и p_2 ; $H_{sf,i}$ и $H_{gr,i}$ – высотные отметки поверхности водосбора и расчетных уровней грунтовых вод. Значения K_f и Δ определялись подбором в среде MS Excel методом общего понижающего градиента. Таким образом, расчет поверхности подземных вод выполнен для: 1) современного периода – по средним за 1967–2005 гг. данным; 2) предшествующих периодов – по зависимостям K_f (5) от характеристик заболоченности водосборов, параметры которых оценивались методом наименьших квадратов с учетом выполнения условий (8), (9) при уровне значимости 5 %:

$$\delta_r \approx \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (8)$$

$$R^2 > 0,36; \frac{|r|}{\delta_r} \geq 2; \frac{|k_r|}{\delta_k} \geq 2, \quad (9)$$

где N – объем выборки; R^2 – квадрат корреляционного отношения; r и δ_r – коэффициент корреляции и погрешность его определения; k_r и δ_k – коэффициент регрессии и погрешность его определения [43]; расчеты выполнены также в среде MS Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ структуры вспомогательного профиля В2–I2 показал, что при максимальной глубине торфяной залежи 3,6 м и скорости ее прироста 0,8 мм/год (согласно [2, 5, 9, 10]) продолжительность болотных

процессов на рассматриваемой территории в пределах северо-восточной окраины Васюганского болотного комплекса составляет около 4,5 тыс. лет, а в его центральной части – 9...10 тыс. лет [5, 9, 10]. Если рассматривать мощность торфяной залежи 0,3 м как отметку, приуроченную к началу интенсивного распространения торфяных болот, то оно (начало интенсивного распространения торфяных болот) было приурочено примерно к сроку 4,1 тыс. лет назад. Обе временные оценки примерно соответствуют периоду сухого потепления [9, 44, 45] с атмосферным увлажнением чуть меньше современного и несколько более высокой температурой приземных слоев атмосферного воздуха [40, 42] и в целом согласуются с общей картиной эволюции Васюганского болотного комплекса [2, 3, 9, 21]. Если перенести пропорции профиля В2–I2 (рис. 2) на основной профиль (рис. 1), то в первом приближении можно принять, что примерно 3...5 тыс. лет назад на рассматриваемой территории болота были в основном низинными, а их суммарная площадь была вдвое меньше площади низинных болот в настоящее время (непосредственно для расчетов принят срок 4,1 тыс. лет назад).

Максимальная мощность слоев низинных торфов на профиле В2–I2 составляет 2,25 м, что позволяет примерно оценить время масштабного появления в структуре торфяной залежи переходных и верховых торфов: $(3,60-2,25)/0,8 \approx 1,7$ тыс. лет назад (с учетом погрешностей

определения – 1,5...2,0 тыс. лет), что, согласно [9, 10], соответствует периоду влажного потепления. При этом основную часть болот, судя по структуре торфяной залежи на профиле В2–I2, можно отнести к низинному типу с общей площадью примерно в 1,7 раза больше, чем площадь низинных болот в современный период.

Подбор параметров Inf/K_f и Δ был проведен при значениях $K_f < 2 \cdot 10^{-5}$ (7), а анализ полученных результатов показал, что, во-первых, расчетные уровни подземных вод (рис. 3) в целом соответствуют наблюдениям [35, 38, 39], в том числе в зимнюю межень 2023 г. при наибольшей близости составов речных и подземных (преимущественно грунтовых) вод (табл. 2). Во-вторых, происходит общее улучшение фильтрационных свойств грунтов по мере приближения к главной дрене – р. Оби (от 2,59 м/сут у р. Андармы до 12,66 м/сут у р. Шегарки; табл. 3). В-третьих, между величиной Inf/K_f и общей площадью низинных болот $f(e-sw)$ выявлена статистически значимая связь (по условию (9); рис. 4). При допущении сохранения этой зависимости на рассматриваемой территории в течение второй половины голоцена была выполнена оценка значений Inf/K_f по срокам 1,7 и 4,1 тыс. лет. В-четвертых, выявлен существенный подъем уровней подземных вод в междуречьях притоков р. Оби одновременно с олиготрофизацией болот в течение примерно последних 1,5...2,0 тыс. лет (рис. 3).

Таблица 2. Результаты опробования подземных и речных вод в водосборе р. Бакчар 11.03.2023 г.

Table 2. Results of testing groundwater and river waters in the catchment area of the Bakchar river, March 11, 2023

№ рис. 1 Fig. 1 no.	Объект/Object	Широта Latitude	Долгота Longi-tude	pH, ед. units of pH	Сумма главных ионов Sum of the main ions	Cl ⁻
		°			мг/дм ³ /mg/dm ³	
BP	р. Бакчар/the Bakchar river	56,999	82,339	7,50	680,4	12,2
BP(g1)	Подземные воды в с. Поротниково (глубина 5 м) Groundwater at Porotnikovo (depth 5 m)	57,007	82,353	7,69	761,9	2,6
GB	р. Галка/the Galka river	57,040	82,067	7,47	713,2	20,3
GB(g1)	Подземные воды в с. Бакчар (глубина 6 м) Groundwater at Bakchar (depth 6 m)	57,017	82,083	7,22	707,0	29,7
GB(g2)	Подземные воды в с. Бакчар (глубина 25 м) Groundwater at Bakchar (depth 25 m)	57,027	82,062	8,78	742,8	54,3

Примечание: сумма главных ионов – сумма концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} ; определение химического состава вод выполнено в гидрогеохимической лаборатории ТПУ.

Note: the sum of the main ions is the sum of the concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} ; water chemical composition was determined in the hydrogeochemical laboratory of the Tomsk polytechnic university.

Таблица 3. Среднемноголетние значения месячных уровней речных вод H_r , расходов речных вод Q_c и их подземной составляющей Q_g , инфильтрации Inf , коэффициента фильтрации K_f и минимальной глубины грунтовых вод Δ в междуречье

Table 3. Average long-term values of monthly levels of river waters H_r , river water discharges Q_c and their underground component Q_g , infiltration Inf , filtration coefficient K_f and minimum groundwater depth Δ in the interfluv

№ рис. 1 Fig. 1 no.	Река/River	H_r	Δ	Q_c	Q_g	Inf	K_f
		м/м		м ³ /с/m ³ /s		м/сут/m/day	
SB	Шегарка/Shegarka	89,88±0,07	3,06	18,9±1,9	3,4±0,2	$2,57 \cdot 10^{-5}$	12,66
IP	Икса/Iksa	100,48±0,05	3,03	6,6±0,9	0,6±0,1	$5,08 \cdot 10^{-5}$	11,09
BP	Бакчар/Bakchar	96,36±0,05	2,63	4,8±0,6	0,4±0,1	$2,03 \cdot 10^{-5}$	3,33
TNM	Тетеренка/Tetyorenka	99,35±0,04	3,01	3,5±0,8	0,8±0,2	$2,23 \cdot 10^{-5}$	3,51
GB	Галка/Galka	93,21±0,03	0,62	4,3±0,9	0,5±0,1	$4,54 \cdot 10^{-5}$	3,12
AP	Андарма/Andarma	93,56±0,07	2,35	6,6±2,9	1,5±0,1	$4,29 \cdot 10^{-5}$	2,59

Примечание: рассмотрены междуречья Обь–Шегарка, Шегарка–Икса, Икса–Бакчар, Бакчар–Тетеренка, Тетеренка–Галка, Галка–Андарма; условные обозначения те же, что и в уравнениях (1)–(6).

Note: the interfluvies of the Ob–Shegarka, Shegarka–Iksa, Iksa–Bakchar, Bakchar–Teterenka, Teterenka–Galka, Galka–Andarma are considered; the conventions are the same as in equations (1)–(6).

Можно предположить, что изменение типа болот от низинного к верховому связано с ухудшением водообмена между болотом и подземными водоносными горизонтами вследствие механической и биогеохимической колюматации подстилающих болото грунтов [22]. При этом, вероятно, сократилась инфильтрация из торфяной залежи в подземные водоносные горизонты. Но, с учетом уменьшения и средних коэффициентов фильтрации, этого было достаточно, чтобы обеспечить параболический профиль поверхности подземных вод, в ряде случаев достигающей условно водоупорного слоя подстилающих болото минеральных грунтов. Причем на горизонтальных границах верхового болота возрастает вероятность выхода на поверхность подземных вод, что также способствует заболачиванию смежных суходолов (по второму сценарию).

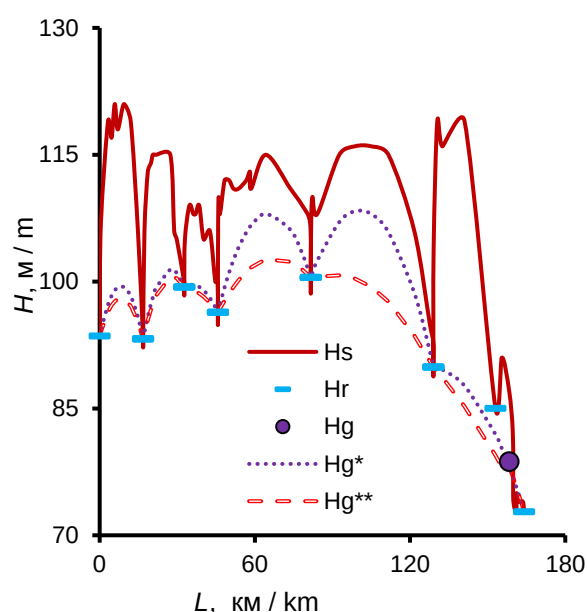


Рис. 3. Профиль АР–ОР и уровни подземных вод в настоящее время и при распространении только низинных болот: H_s – поверхность водосбора или дна рек; H_r – среднедолгосрочный уровень речных и озерных (озеро у с. Мельниково) вод; H_g – среднедолгосрочный уровень воды в скважине 63р в с. Мельниково; H_g^* – расчетный среднегодовой уровень подземных вод в среднем за 1967–2005 гг.; H_g^{**} – расчетный уровень подземных вод при условии, что все болота низинного типа, а их площадь в 1,7 раза больше, чем в настоящее время (ориентировочно 1,5...2,0 тыс. лет назад)

Fig. 3. AP–OP profile and groundwater levels at the present time and with the distribution of only low-moor peat swamps: H_s is the surface of the watershed or river bottom; H_r is the average long-term level of river and lake (lake near Melnikovo) waters; H_g is the average long-term water level in the well 63p at Melnikovo; H_g^* is the estimated average annual groundwater level on average for 1967–2005; H_g^{**} is the estimated groundwater level, provided that all swamps are of low-moor peat type, and their area is 1.7 times larger than at present (approximately 1.5...2,0 thousand years ago)

В случае расчетов на срок 4,1 тыс. лет назад при меньшей общей заболаченности, площади низинных болот и более высоких значениях Inf/K_f условия отсутствия постоянного затопления поверхности водосборов удалось достичь частично лишь при понижении отметок дна рек: Андарма – на 2,5 м; Галка – 1,0 м; Тетеренка – 0,9 м; Бакчар – 1,6 м; Икса – 10,2 м; Шегарка – 14,6 м (рис. 5). Эти значения в целом соответствуют данным о мощности аллювиальных отложений притоков р. Оби на рассматриваемой территории, составляющей от 0,5–1,0 м для малых водотоков и до 20 м и более для средних рек [4, 40, 46, 47].

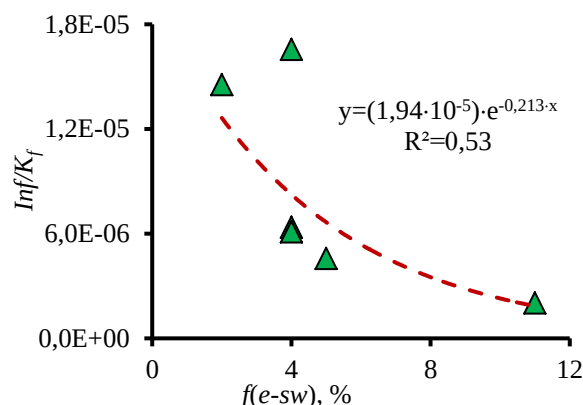


Рис. 4. Зависимость отношения инфильтрации Inf к коэффициенту фильтрации K_f от доли низинных болот $f(e-sw)$ в общей площади водосбора

Fig. 4. Dependence of the ratio of infiltration Inf to the filtration coefficient K_f on the share of low-moor peat swamps $f(e-sw)$ in the total catchment area

Более того, с учетом оценок русловых деформаций рек Томской области в настоящее время [48] можно предположить, что значительный объем таких деформаций был приурочен к раннему и среднему голоцену при сочетании повышенного водного стока, его существенной внутригодовой изменчивости, наличии многолетней (сплошной или островной) мерзлоты и минимуме растительности [4, 40, 41]. Подобные условия можно в настоящее время найти в ряде регионов мира, например, на плато Укок в верховьях бассейна р. Катунь (Горный Алтай), где наблюдаются участки интенсивной водной эрозии русел и водосборной поверхности р. Акалаха – элемента речной сети (Акалаха–Джазатор)–Аргут–Катунь–Обь. Там же имеются и заболоченные участки, в том числе с отложениями торфа более 0,3 м (в водосборе р. Аргамджи – элементе системы Аргамджи–Калгуты–Акалаха), которые при определенных обстоятельствах, видимо, могли бы сыграть роль «ядер» заболачивания. Еще один из возможных примеров развития близких по смыслу эрозивно-аккумулятивных процессов в период начального заболачивания юго-востока Западно-Сибирской равнины – территории в пределах зоны тундры и лесотундры на севере Обского бассейна [41, 49].

Таким образом, примерно от 9...10 до 3...5 тыс. лет назад на фоне сохранения многолетней мерзлоты

(сплошной или островной [21]), некоторого снижения водного стока, интенсивной водной эрозии и заболачивания водосборов гидрогеологические условия в рассматриваемой части юго-востока Западно-Сибирской равнины с высокой вероятностью были близки к условиям, наблюдаемым в настоящее время в ее арктической части и плато в Горном Алтае. Затем, примерно 3...5 тыс. лет назад, началось масштабное распространение торфяных болот (с глубиной торфяной залежи более 0,3 м) одновременно с подъемом отметок речного дна и уровней речных вод. В последующий период, начиная примерно с 2,0...1,5 тыс. лет назад, интенсивность водно-эрозионных процессов снизилась, а направленность болотных процессов сместилась в сторону увеличения доли переходных и верховых болот. При этом происходило постепенное увеличение уровней грунтовых вод на междуречьях, наблюдаемое и в настоящее время [2, 10, 35, 38, 39, 42].

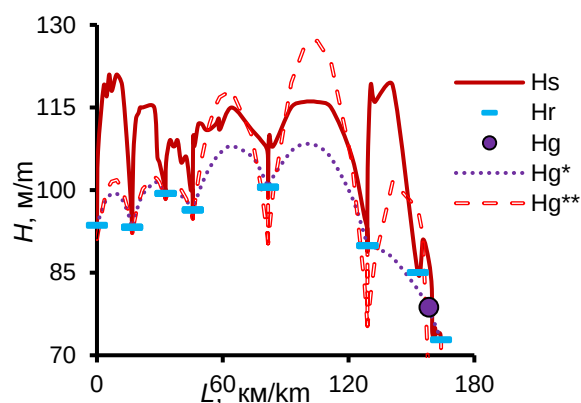


Рис. 5. Профиль АР–ОР и уровни подземных вод в настоящее время и в период начального заболачивания: H_s – поверхность водосбора или дна рек; H_r – среднедолгосрочный уровень речных и озерных (озеро у с. Мельниково) вод; H_g – среднесреднегодный уровень воды в скважине 63р в с. Мельниково; H_g^* – расчетный среднегодовой уровень подземных вод в среднем за 1967–2005 гг.; H_g^{**} – расчетный уровень подземных вод при условии, что все болота низинного типа с глубиной не более 0,3 м, а их площадь в 2 раза меньше, чем в настоящее время (ориентировочно 4 тыс. лет назад)

Fig. 5. AP–OP profile and groundwater levels at present and during initial bogging: H_s is the surface of the watershed or river bottom; H_r is the average long-term level of river and lake (lake near Melnikovo) waters; H_g is the average long-term water level in the well 63p at Melnikovo; H_g^* is the estimated average annual groundwater level on average for 1967–2005; H_g^{**} is the estimated groundwater level, provided that all swamps are of lowland type with a depth of no more than 0,3 m, and their area is 2 times less than at present (approximately 4 thousand years ago)

В ближайшей перспективе, в случае сохранения тенденций избыточного увлажнения и некоторой стабилизации прироста температуры приземных слоев атмосферного воздуха, судя по полученным данным (рис. 3–5), можно ожидать увеличения площади вер-

ховых болот и, как следствие, дальнейшего подъема уровней подземных вод, отмеченного ранее в [35, 42]. Однако при продолжении тренда к потеплению, в соответствии с указанными в [27] закономерностями, вероятны торфяные пожары [48, 50], а при определенных условиях и деградация болот с возвратным формированием евтрофных болотных экосистем.

Заключение

Полученные оценки (особенно временные) являются приближенными и характеризуют, прежде всего, рассмотренный профиль (рис. 1) в южной части водосбора р. Чаи. Тем не менее анализ выполненных расчетов позволил сделать следующие выводы:

- 1) заболачивание данной территории является закономерным процессом, обусловленным не только избыточным увлажнением и низкими значениями коэффициентов фильтрации, но и конфигурацией речной сети, которая, в свою очередь, определяется комплексом гидроклиматических, геоморфологических и геологических процессов как на этапе первичного заболачивания, так и в предшествующие геологические периоды;
- 2) процессы заболачивания (аккумуляции органического вещества) взаимосвязаны с противоположно направленными процессами водной эрозии; минеральное вещество с поверхности водосборов поступает в речную сеть и накапливается на участках речных русел, вызывая постепенное изменение условий взаимодействия речных и подземных вод с тенденцией роста уровней последних;
- 3) по мере олиготрофизации болот и сокращения доли низинных болот уменьшается водообмен между болотами и подземными водоносными горизонтами, а уровни подземных вод возрастают и в ряде случаев могут «подпирать» подстилающие болота минеральные грунты с низкими фильтрационными свойствами; в дальнейшем условия заболачивания все сильнее определяются влиянием капиллярных явлений, что требует проведения дополнительных исследований в этой области;
- 4) указанные выше особенности должны учитываться при осуществлении хозяйственной деятельности на заболоченных территориях, особенно при проведении рекультивации верховых болот;
- 5) сильнейшая заболоченность Западно-Сибирской равнины – уникальное сочетание различных природных процессов, возникших в среднем и позднем голоцене и в ряде случаев не ослабляющихся, а, напротив, усиливающихся хозяйственной деятельностью; к этому явлению нужно подходить осторожно и взвешенно, с учетом возможности глобальных последствий дальнейшей эволюции болотных экосистем и связанных с ними речных систем и подземных водоносных горизонтов; но необходимо понимать, что изменения неизбежны независимо от характера и степени антропогенных воздействий.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 23-27-00039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карта торфяных месторождений Западной Сибири. Масштаб 1:1000000: объяснительная записка / под ред. Р.Г. Матухина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН: Филиал «Гео», 2000. – 33 с.
2. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слука, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
3. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies* / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – V. 190. – P. 315–341.
4. Ландшафты болот Томской области / Н.С. Евсеева, А.А. Синюткина, Ю.А. Харанжевская, Е.С. Воистинова, Т.В. Ромашова, В.В. Хромых, В.А. Земцов, И.Б. Сорокин, Е.Н. Гузова, Т.Н. Жилина, З.Н. Квасникова, О.В. Хромых, В.С. Хромых / под ред. Н.С. Евсеевой. – Томск: Изд-во HTJI, 2012. – 400 с.
5. Chlachula J. Climate history and early peopling of Siberia, Earth and Environmental sciences/ Ed. by Dr. Imran Ahmad Dar. – Rijeka, Croatia: InTech Europe, University Campus, 2011. – P. 495–538. URL: <http://www.intechopen.com/books/earth-and-environmental-sciences/climate-history-and-early-peopling-of-siberia> (дата обращения 15.08.2023).
6. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status / S. Hu, Zh. Niu, Y. Chen, L. Li, H. Zhang // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 586. – P. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
7. Great Vasyugan mire: how the world's largest peatland helps addressing the world's largest problems / S.N. Kirpotin, F. Tanneberger, H. Joosten, I.V. Volkov // *Ambio*. – 2021. – V. 50. – № 11. – P. 2038–2049. DOI: 10.1007/s13280-021-01520-2.
8. Holocene wildfire regimes in Western Siberia: interaction between peatland moisture conditions and the composition of plant functional types / A. Feurdean, M. Pfeiffer, G. Butiseaca, A. Niamir, A.C. Diaconu, I. Tantau, M. Galka, S.M. Hutchinson, N. Gorina, S. Tonkov, H. Zhang, S. Kirpotin // *Climate of the Past*. – 2022. – V. 18. – № 6. – P. 1255–1274. DOI: 10.5194/cp-18-1255-2022.
9. Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // *Большое Васюганское болото*. – Томск: ИОА СО РАН, 2002. – С. 174–186.
10. Geochemical features of peat deposits at oligotrophic bogs in the southern taiga subzone of West Siberia / E.E. Veretennikova, I.V. Kuryina, E.A. Dyukarev, E.A. Golovatskaya, S.V. Smirnov // *Geochemistry International*. – 2021. – V. 59. – № 6. – P. 618–631. DOI: 10.1134/S0016702921050098.
11. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.
12. Гидро- и инженерно-геологические условия юго-запада Западно-Сибирской равнины / отв. ред. В.М. Матусевич. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1987. – 129 с.
13. Shotyk W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters // *Earth-Science Reviews*. – 1988. – № 25. – P. 95–176. DOI: 10.1016/0012-8252(88)90067-0.
14. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview / A.P. Grootjans, E.B. Adema, W. Bleuten, H. Joosten, M. Madaras, M. Janáková // *Applied Vegetation Science*. – 2006. – № 9. – P. 175–184.
15. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // *Geochemistry International*. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
16. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С.М. Новикова. – СПб: ВВМ, 2009. – 536 с.
17. Zemtov V.A., Savichev O.G. Resources, regime and quality of surface waters in the Ob River basin: history, current state and problems of research // *International Journal of Environmental Studies*. – 2015. – V. 72. – № 3. – P. 386–396. DOI: 10.1080/00207233.2015.1019299.
18. Рассказов Н.М. Основные гидрогеологические и гидрогеохимические особенности торфяных месторождений центральной части Обь-Иртышского междуречья и некоторые вопросы гидрогеохимических исследований болот / Н.М. Рассказов, П.А. Удодов, Т.Я. Емельянова, А.Д. Назаров, В.А. Шамолин // *Подземные воды Сибири и Дальнего Востока* / отв. ред. И.С. Ломоносов, Н.А. Маринов, Е.В. Пиннекер. – М.: Наука, 1971. – С. 229–232.
19. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia) / A.M. Schipper, R. Zeefat, F. Tanneberger, J.P. van Zuidam, W. Hahne, S.A. Schep, S. Loos, W. Bleuten, H. Joosten, E.D. Lapshina, M.J. Wassen // *Plant Ecology*. – 2007. – V. 193. – P. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
20. Szymkiewicz A. Modelling water flow in unsaturated porous media accounting for nonlinear permeability and material heterogeneity. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag 2013. – 237 p.
21. Преис Ю.И. Криогенез болотообразовательного процесса на территории Большого Васюганского болота // *Большое Васюганское болото*. – Томск: ИОА СО РАН, 2002. – С. 45–63.
22. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 113. – 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
23. Biogeochemistry of Holocene peatlands in the baraba forest-steppe (southern West Siberia) / G.A. Leonova, A.E. Maltsev, Yu.I. Preis, L.V. Miroshnichenko // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 124. – 104811. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104811.
24. Савичев О.Г., Ян Х., Чжоу Д. Гидрогеодинамические и гидрогеохимические условия самоочищения вод Обского болота (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 115–125. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3656.
25. Kalbus E., Reinstorf F., Schirmer M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2006. – № 10. – P. 873–887. URL: www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/873/2006/ (дата обращения 15.08.2023).
26. Hendriks M.R. Introduction to physical hydrology. – Oxford, New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
27. Савичев О.Г. Гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2021. – 167 с.
28. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
29. ГОСТ 21123-85. Торф. Термины и определения. Дата введения 01.07.1986 г. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 85 с.
30. Альбом аэрофотоснимков растительного покрова торфяных месторождений центральной части Западной Сибири. – М.: Геолотрфразведка, 1973. – 83 с.
31. Основные гидрологические характеристики. Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 488 с.
32. The phytoindication method for mapping peatlands in the taiga zone of the West-Siberian Plain / V.A. Bazanov, A.E. Berezin, O.G. Savichev, A.A. Skugarev // *International Journal of Environmental Studies*. – 2009. – V. 66. – № 4. – P. 473–484. DOI: 10.1080/00207230903303729.
33. Р 52.08.874-2018. Определение гидрографических характеристик картографическим способом. – СПб: МПР РФ, Росгидромет, ГТИ, 2018. – 178 с.
34. Sinyutkina A.A. Characterization of peat deposit using ground penetrating radar: Survey experiments and data interpretation // *IOP Conf. Series (the Institute of Physics Publishing Ltd., United Kingdom): Earth and Environmental Science*. – 2021. – V. 928. – 012011. – P. 1–9. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012011.
35. Лыготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения среднесезонных и среднегодовых уровней и температуры подземных вод верхней гидродинамической зоны в Томской области // *Геоэкология*. – 2010. – № 1. – С. 23–29.
36. Гидрогеология СССР. Т. 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / под ред. В.А. Нуднера. – М.: Недра, 1970. – 368 с.
37. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. 2020 год. Водный кадастр. – М.: МПР РФ, Росгидромет, 2021. – 153 с.
38. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2020 г. Информационный бюлле-

- ть, выпуск 17. – Томск: филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», 2021. – 194 с.
39. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2021 г. Информационный бюллетень, выпуск 18. – Томск: филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», 2022. – 204 с.
40. Зубаков В.А. Палеогеография Западно-Сибирской низменности в плейстоцене и позднем плиоцене. – Л.: Наука, 1972. – 200 с.
41. Малолетко А.М. Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое. – Томск: Томск. гос. у-т, 2008. – 288 с.
42. Моисеева Ю.А. Изменения подземного стока таежной зоны Западной Сибири в голоцене: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 22 с.
43. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
44. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. Ecosystem dynamics. From the past to the future. – Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2014. – 321 p.
45. Количественная реконструкция годовых температур воздуха Алтайского региона за последние 1400 лет по данным аналитической микростратиграфии ленточных глин оз. Кучерлинское / А.В. Дарьин, Г. Чу, Ц. Сан, В.В. Бабич, И.А. Калугин, Т.И. Маркович, В.С. Новиков, М.А. Максимов, Ф.А. Дарьин, Д.С. Сороколетов, Я.В. Ракшун, А.А. Гогин, Р.А. Сенин // Известия РАН. Серия географическая. – 2021. – Т. 85. – № 1. – С. 97–108. DOI: 10.31857/S2587556621010039.
46. Создание электронной версии карты четвертичных отложений томской области масштаба 1:500000 / Ю.В. Макушин, Н.Г. Глущенко, Н.И. Глущенко, Е.К. Панаева // Геоинформатика-2000: Труды Междунардн. научно-практ. конф. – Томск, 12–14 сентября 2000. – Томск: Томск. гос. ун-т, 2000. – С. 142–144.
47. Строкова Л.А., Емельянова Т.Я. Инженерно-геологические критерии региональной оценки устойчивости геологической среды к техногенным воздействиям // Обской вестник. – 1999. – № 1–2. – С. 32–38.
48. Экзогенные геологические процессы на территории Томской области в 2000 г. Информационный бюллетень. Вып. 6. – Томск: ТЦ «Томскгеомониторинг», 2001. – 72 с.
49. Строкова Л.А., Епифанова Е.А. Оценка суффозионной опасности территории пос. Сабетта (полуостров Ямал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 95–106.
50. Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Effects of wildfire on the water chemistry of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // IOP Conf. Series (the Institute of Physics Publishing Ltd., United Kingdom): Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 928. – 012006. – P. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012006

Поступила: 06.09.2023 г.

Дата рецензирования: 14.09.2023 г.

Информация об авторах

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314.6(282.256.1)

CHANGES IN HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS DURING BOGGING IN THE SOUTHEAST OF THE WEST SIBERIAN PLAIN

Oleg G. Savichev,
OSavichev@mail.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the research is determined by the need to understand the mechanisms of interaction between groundwater, swamp and river waters in conditions of severe swampiness in the taiga zone of Western Siberia to solve a number of scientific and engineering problems both at present and in the future.

The aim: quantitative assessment of changes in the levels of groundwaters during the characteristic periods of swamping of the southeast of the West Siberian Plain: 1) the beginning of an intensive spread of peat swamps with a peat deposit thickness of 0,3 m or more; 2) oligotrophization of swamps.

Methods: methods of mathematical modeling, statistical methods.

Results and conclusions. The author has carried out the analysis of peat deposit structure in the southern part of the Chaya river (a tributary of the Ob river) catchment area. The large-scale formation of peat swamps (with a peat thickness of 0,3 m or more) in the area under consideration occurred approximately 4 thousand years ago; the oligotrophization of the peat deposit (on a regional scale) occurred approximately 2,0...1,5 thousand years ago. In both cases, the main part of the swamps presumably could be attributed to the lowland type, but compared with the modern period in the first case their total area was 2 times less, and in the second was 1,7 times more. Taking into account these estimates, the average values of infiltration I_{nf} and filtration coefficients K_f were determined, the ratio I_{nf}/K_f dependence on the area of low-moor peat swamps was obtained, and groundwater levels were calculated at the present time and for periods of 1,7 and 4,1 thousand years ago. During the oligotrophization of the peat deposit (approximately 2,0...1,5 thousand years ago), with a high probability, there was a deterioration in water exchange between swamps and underground aquifers and an increase in groundwater levels. The beginning of intensive regional swamping (about 4 thousand years ago) occurred against the background of intense water-erosion processes. This results in accumulation of river alluvium accompanied by a rise in the levels of river water and then groundwater.

Key words:

groundwater, swamp and river waters, southeast of the West Siberian Plain,
ratio of infiltration to filtration coefficient, groundwater level regime.

The research was carried out using the RSF grant (project no. 23-27-00039).

REFERENCES

1. *Karta torfyanykh mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri. Masshtab 1:1000000: obyasnitel'naya zapiska* [Map of peat deposits in Western Siberia. Scale 1:1000000: explanatory note]. Ed. by R.G. Matukhin. Novosibirsk, SB RAS Publ. house, Branch «Geo», 2000. 33 p.
2. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p.
3. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. Vol. 190, pp. 315–341.
4. Evseeva N.S., Sinyutkina A.A., Kharanzhevskaya Yu.A., Voistinova E.S., Romashova T.V., Khromykh V.V., Zemtsov V.A., Sorokin I.B., Guzova E.N., Zhilina T.N., Kvasnikova Z.N., Khromykh O.V., Khromykh V.S. *Landshafty bolot Tomskoy oblasti* [Landscapes of swamps of the Tomsk region]. Tomsk, NTL Publ., 2012. 400 p.
5. Chlachula J. *Climate history and early peopling of Siberia, earth and environmental sciences*. Ed. Dr. Imran Ahmad Dar. Rijeka, Croatia, InTech Europe, University Campus, 2011. pp. 495–538. Available at: <http://www.intechopen.com/books/earth-and-environmental-sciences/climate-history-and-early-peopling-of-siberia> (accessed 15 August 2023).
6. Hu S., Niu Zh., Chen Y., Li L., Zhang H. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 586, pp. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
7. Kirpotin S.N., Tanneberger F., Joosten H., Volkov I.V. Great Vasyugan mire: how the world's largest peatland helps addressing the world's largest problems. *Ambio*, 2021, vol. 50, no. 11, pp. 2038–2049. DOI: 10.1007/s13280-021-01520-2.
8. Feurdean A., Pfeiffer M., Butiseaca G., Niamir A., Diaconu A.C., Tantau I., Galka M., Hutchinson S.M., Gorina N., Tonkov S., Zhang H., Kirpotin S. Holocene wildfire regimes in Western Siberia: interaction between peatland moisture conditions and the composition of plant functional types. *Climate of the Past*, 2022, vol. 18, no. 6, pp. 1255–1274. DOI: 10.5194/cp-18-1255-2022.
9. Pologova N.N., Lapshina E.D. *Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo Vasuganskogo bolota* [Carbon accumulation in peat bog deposits of the Great Vasyugan bog]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 174–179.
10. Veretennikova E.E., Kuryina I.V., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Smirnov S.V. Geochemical features of peat deposits at oligotrophic bogs in the southern taiga subzone of West Siberia. *Geochemistry International*, 2021, vol. 59, no. 6, pp. 618–631. DOI: 10.1134/S0016702921050098.
11. Ivanov K.E. *Vodoobmen v bolotnykh landschaftakh* [Water exchange in mire landscapes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p.
12. *Gidro- i inzhenerno-geologicheskie usloviya yugo-zapada Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Hydro- and engineering-geological conditions of the south-west of the West Siberian Plain]. Ed. by V.M. Matusevich. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch, 1987. 129 p. In Rus.
13. Shotyk W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters. *Earth-Science Reviews*, 1988, no. 25, pp. 95–176. DOI: 10.1016/0012-8252(88)90067-0.

14. Grootjans A.P., Adema E.B., Bleuten W., Joosten H., Madaras M., Janáková M. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview. *Applied Vegetation Science*, 2006, vol. 9, pp. 175–184.
15. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
16. *Gidrologiya zabolochennykh territoriy zony mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri* [Hydrology of wetlands in the permafrost zone of Western Siberia]. Ed. by S.M. Novikov. St. Petersburg, VVM Publ., 2009. 536 p.
17. Zemtsov V.A., Savichev O.G. Resources, regime and quality of surface waters in the Ob River basin: history, current state and problems of research. *International Journal of Environmental Studies*, 2015, vol. 72, no. 3, pp. 386–396. DOI: 10.1080/00207233.2015.1019299.
18. Rasskazov N.M., Udodov P.A., Emelyanova T.Ya., Nazarov A.D., Shamolin V.A. Osnovnye gidrogeologicheskie i gidroekhimicheskie osobennosti torfyanykh mestorozhdeniy tsentralnoy chasti Ob-Irtyshskogo mezhdurechya i nekotorye voprosy gidroekhimicheskikh issledovaniy bolot [Main hydrogeological and hydrogeochemical features of peat deposits in the central part of the Ob-Irtysh interfluvium and some issues of hydrogeochemical studies of bogs]. *Podzemnye vody Sibiri i Dalnego Vostoka* [Ground waters of Siberia and the Far East]. Ed. by I.S. Lomonosov, N.A. Marinov, E.V. Pinneker. Moscow, Nauka Publ., 1971. pp. 229–232.
19. Schipper A.M., Zeefat R., Tanneberger F., Van Zuidam J.P., Hahne W., Schep S.A., Loos S., Bleuten W., Joosten H., Lapshina E.D., Wassen M.J. Vegetation characteristics and ecohydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia). *Plant Ecology*, 2007, vol. 193, pp. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
20. Szymkiewicz A. *Modelling water flow in unsaturated porous media accounting for nonlinear permeability and material heterogeneity*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag 2013. 237 p.
21. Preis Yu.I. Kriogeneza boloto obrazovatel'nogo protsesssa na territorii Bolshogo Vasyuganskogo bolota [Cryogenesis of the swamp-forming on the territory of the Great Vasyugan swamp]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyaniye i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 45–63.
22. Savichev O., Soldatov E., Rudmin M., Mazurov A. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 113, 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
23. Leonova G.A., Maltsev A.E., Preis Yu.I., Miroshnichenko L.V. Biogeochemistry of holocene peatlands in the baraba forest-steppe (southern West Siberia). *Applied Geochemistry*, 2021, vol. 124, 104811. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104811.
24. Savichev O.G., Yang H., Zhou D. Hydrogeodynamic and hydrogeochemical conditions of self-clearance of the Obskoe fen water (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 115–125. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3656.
25. Kalbus E., Reinstorff F., Schirmer M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, vol. 10, pp. 873–887. Available at: www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/873/2006/ (accessed 15 August 2023).
26. Hendriks M.R. *Introduction to physical hydrology*. Oxford, New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
27. Savichev O.G. *Gidroeologicheskoe obosnovanie vodokhozyaystvennykh resheniy* [Hydroecological substantiation of water management decisions]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2021. 167 p.
28. GOST 19179-73. *Gidrologiya sushi. Terminy i opredeleniya* [Land hydrology. Terms and definitions]. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p.
29. GOST 21123-85. *Torf. Terminy i opredeleniya* [Peat. Terms and definitions]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1985. 85 p.
30. *Album aerofotosnimkov rastitelnogo pokrova torfyanykh mestorozhdeniy tsentralnoy chasti Zapadnoy Sibiri* [Album of photographs of the vegetation cover of peat deposits in the central part of Western Siberia]. Moscow, Geol'torfrazvedka Publ., 1973. 83 p.
31. *Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki. T. 15. Altay, Zapadnaya Sibir i Severnyy Kazakhstan. No. 1. Verkhnyaya i Srednyaya Ob* [Basic hydrological characteristics. Vol. 15. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan. Iss. 1. Upper and Middle Ob]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 488 p.
32. Bazanov V.A., Berezin A.E., Savichev O.G., Skugarev A.A. The phytoindication method for mapping peatlands in the taiga zone of the West-Siberian Plain. *International Journal of Environmental Studies*, 2009, vol. 66, no. 4, pp. 473–484. DOI: 10.1080/00207230903303729.
33. R 52.08.874-2018. *Opredelenie gidrograficheskikh kharakteristik kartograficheskim sposobom* [Determination of hydrographic characteristics by cartographic method]. St. Petersburg, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Roshydromet Publ., 2018. 178 p.
34. Sinyutkina A.A. Characterization of peat deposit using ground penetrating radar: Survey experiments and data interpretation. *IOP Conf. Series (the Institute of Physics Publishing Ltd., United Kingdom): Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 928, 012011, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012011.
35. Lgotin V.A., Savichev O.G., Makushin Yu.V. Long-term changes in the average seasonal and average annual levels and temperature of groundwater in the upper hydrodynamic zone in the Tomsk region. *Geocology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2010, no. 1, pp. 23–29. In Rus.
36. *Gidrogeologiya SSSR. T. 16. Zapadno-Sibirskaya ravnina (Tyumenskaya, Omskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti)* [Hydrogeology of the USSR. Vol. 16. The West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)]. Ed. by V.A. Nudner. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p.
37. *Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispolzovanie i kachestvo. 2020 god* [Water cadastre. Surface and groundwater resources, their use and quality. 2020]. St. Petersburg, Roshydromet Publ., 2021. 153 p.
38. *Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federal'nogo okruga v 2020 g. Informatsionnyy byulleten* [Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2020. Informational bulletin]. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalnyy tsentr GMSN», FGBU «Gidrospektogeologiya» Publ., 2021. Vol. 17, 194 p.
39. *Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federal'nogo okruga v 2021 g. Informatsionnyy byulleten* [Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2021. Informational bulletin]. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalnyy tsentr GMSN», FGBU «Gidrospektogeologiya» Publ., 2022. Vol. 18, 204 p.
40. Zubakov V.A. *Paleogeografiya Zapadno-Sibirskoy nizmennosti v pleystotsene i pozdnepleistotsene* [Paleogeography of the West Siberian Lowland in the Pleistocene and Late Pleistocene]. Leningrad, Nauka Publ., 1972. 200 p.
41. Maloletko A.M. *Evolutsiya rechnykh sistem Zapadnoy Sibiri v mezozoe i kaynozoe* [Evolution of the river systems of Western Siberia in the Mesozoic and Cenozoic]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2008. 288 p.
42. Moiseeva Yu.A. *Izmeneniya podzemnogo stoka tayezhnoy zony Zapadnoy Sibiri v golotsene*. Dis. Kand. nauk [Changes in the underground runoff of the taiga zone of Western Siberia in the Holocene. Cand. Dis.]. Tomsk, 2018. 22 p.
43. SP 33-101-2003. *Svod pravil po proektirovaniyu i stroitel'stvu. Opredeleniye osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
44. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. *Ecosystem Dynamics. From the past to the future*. Chichester, West Sussex, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 321 p.
45. Daryin A.V., Chu G., San C., Babich V.V., Kalugin I.A., Markovich T.I., Novikov V.S., Maksimov M.A., Daryin F.A., Sorokolev D.S., Rakshun Ya.V., Gogin A.A., Senin R.A. Quantitative reconstruction of the Altai region annual air temperatures over the past 1400 years according to analytical microstratigraphy of Lake Kucherla varved clays. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2021, vol. 85, no. 1, pp. 97–108. In Rus. DOI: 10.31857/S2587556621010039.

46. Makushin Yu.V., Glushchenko N.G., Glushchenko N.I., Panaeva E.K. Sozdanie elektronnoy versii karty chetvertichnykh otlozheniy tomskoy oblasti masshtaba 1:500000 [Creation of an electronic version of the map of Quaternary deposits of the Tomsk region at a scale of 1:500000]. *Geoinformatika-2000. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geoinformatics-2000. Proceedings of the International scientific and practical conference]. Tomsk, September 12–14, 2000. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2000. pp. 142–144.
47. Strokova L.A., Emelyanova T.Ya. Inzhenerno-geologicheskie kriterii regionalnoy otsenki ustoychivosti geologicheskoy sredy k tekhnogennym vozdeystviyam [Engineering-geological criteria for regional assessment of the stability of the geological environment to technogenic impacts]. *Obskoy vestnik*, 1999, no. 1–2, pp. 32–38.
48. Ekzogennyye geologicheskie protsessy na territorii Tomskoy oblasti v 2000 godu [Exogenous geological processes on the territory of the Tomsk region in 2000]. *Informatsionny byulleten* [Information bulletin]. Tomsk, TC Tomskgeomonitoring Publ., 2001. Iss. 6, 72 p.
49. Strokova L.A. Assessment of suffosion in the territory of settlement Sabetta, the Yamal peninsula. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 7, pp. 95–106. In Rus.
50. Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Effects of wildfire on the water chemistry of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *IOP Conf. Series (the Institute of Physics Publishing Ltd., United Kingdom): Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 928, 012006, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012006.

*Received: 6 September 2023.
Reviewed: 14 September 2023.*

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.