

УДК 556.332.52

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ИРТЫШ-ОБСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА

Балобаненко Андрей Александрович¹,
baa@sfo.geomonitoring.ru

Васильев Денис Иванович²,
vaslev_h@mail.ru

Дутова Екатерина Матвеевна³,
dutova@tpu.ru

Кузеванов Константин Иванович³,
kki@tpu.ru

¹ Филиал «Сибирский региональный центр государственного мониторинга состояния недр», «Гидроспецгеология», Россия, 634050, г. Томск, ул. Никитина, 99.

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Задачи исследования уровня режима подземных вод тесно связаны с необходимостью прогноза их ресурсов под влиянием как естественных, так и искусственных факторов для разработки научных основ рационального использования водных ресурсов и эффективного управления режимом подземных вод на исследуемой территории.

Цель: изучение изменения уровня режима подземных вод хозяйственно-питьевого назначения четвертичных отложений юга Западно-Сибирского артезианского бассейна на основе результатов многолетних режимных наблюдений.

Объекты: подземные воды Иртыш-Обского артезианского бассейна II порядка, юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна I порядка, наиболее активно вовлекаемые в сферу антропогенной деятельности. Территория исследования приурочена к провинции с устойчивым сезонным промерзанием зоны аэрации, где основное питание грунтовых вод осуществляется в весенний период за счет снеготаяния.

Методы. Методика ведения наблюдений за уровнями подземных вод определялась нормативными документами бывшего Министерства геологии СССР, а затем Министерства природных ресурсов РФ, в данной работе приведена статистическая обработка временных рядов наблюдений за уровнями подземных вод и сопоставление полученных результатов с данными о водном режиме поверхностных водотоков и климатическими характеристиками района исследования.

Результаты. Выявлено ведущее влияние климатических условий на основные закономерности естественного гидродинамического режима подземных вод. Показана различная степень интенсивности влияния внешних факторов, выраженная амплитудой хода уровня подземных вод, в зависимости от типа их режима и степени увлажнения территории. Влияние естественных факторов на режим подземных вод ослабевает по мере удаления от дренирующих границ и с увеличением глубины залегающих водовмещающих отложений.

Ключевые слова:

Подземные воды, четвертичные отложения, Иртыш-Обский артезианский бассейн, типы режима, сезонные и многолетние изменения.

Введение

Изучение уровня режима подземных вод имеет важное значение и играет заметную роль в комплексе гидрогеологических исследований, осуществляемых для решения различных теоретических и прикладных задач.

Особенно актуальны вопросы изучения режима подземных вод для регионов, где водоснабжение в большинстве населенных пунктов практически полностью базируется на использовании подземных вод. К настоящему времени такая ситуация сложилась и на юге Сибирского региона.

В практическом плане характеристика режима подземных вод является неотъемлемой частью гидрогеологических работ по подсчёту запасов подземных вод. При этом требуется показать особенности сезонных колебаний уров-

ня за несколько лет, предшествующих геологоразведочным работам на подземные воды. В этом отношении региональные работы по изучению режима подземных вод являются важной составляющей, дополняющей результаты локального мониторинга, глубина наблюдений которого ограничена текущими сроками эксплуатации конкретного водозабора и не охватывает многолетнего периода.

С учётом продолжительности амортизационного срока эксплуатации водозаборов, исчисляемого тремя десятилетиями, немаловажной проблемой является оценка многолетних тенденций изменения запасов подземных вод. Динамика запасов теснейшим образом связана с ходом уровней подземных вод и определяет необходимость применения научно обоснованных подходов к прогнозу изменения гидрогеологических условий на основе изучения режима подземных вод.

В настоящей работе приведены результаты обработки данных режимных наблюдений, накопленные за многолетний период, которые позволяют показать важнейшие закономерности пространственно-временного изменения состояния подземных вод, имеющие теоретическую значимость с позиций оценки степени влияния внешних факторов на формирование уровня режима и практическую ценность для характеристики основных типов режима подземных вод.

В основу работы положены данные режимных наблюдений, полученные с середины 1960-х по 1995 гг. сотрудниками Томской геологоразведочной экспедицией (ТГРЭ), а с 1996 по 2022 гг. работниками предприятия ООО «Томскеомониторинг» по режимным скважинам государственной опорной наблюдательной сети в рамках ведения мониторинга геологической среды на территории СФО.

К настоящему времени по действующей наблюдательной сети, включающей более трёхсот специализированных наблюдательных пунктов, накоплены временные ряды наблюдений, охватывающие около 130 тысяч частных значений замеров уровней подземных вод.

Выбор пунктов наблюдений для последующего анализа осуществлялся исходя из продолжительности рядов, наличия в них пропусков данных, отсутствия явно выраженного антропогенного воздействия на подземные воды и с учетом полноты охвата наиболее распространенных на рассматриваемой территории водоносных отложений четвертичного возраста.

Для предварительного анализа имеющегося материала разработана и использована специализированная база данных, позволяющая оперативно просматривать данные мониторинга как за весь период многолетних наблюдений, так и за отдельно выбранный год. Оперативная визуализация доступна не только для всего массива наблюдательных пунктов, но и для каждой наблюдательной скважины по выбору её номера из общего списка.

Исследованиям по режиму подземных вод посвящено большое количество публикаций. Еще советские ученые, такие как Г.Н. Каменский [1], О.К. Ланге [2], М.Е. Альтовский [3], П.А. Киселев [4], А.В. Лебедев [5], В.С. Ковалевский [6] и другие, внесли огромный вклад в изучение режима, баланса, зональности и закономерности режима подземных вод.

Современные гидрогеологи в своих работах уделяют достаточно внимания методическим вопросам, обработке материалов с использованием цифровых технологий, в том числе приемам прогнозирования на основе технологий численного моделирования. Известны результаты исследования режима подземных вод в условиях различных типов горно-складчатых и артезианских гидрогеологических структур, выполненные в разное время С.О. Гриневским [7, 8], Е.М. Гусевым [9], О.Н. Насоновой [9] и другими. Показаны приемы прогнозирования и взаимосвязи изменения климата и ряда характеристик подземных вод. Климатические изменения на территории России изучались Ю.П. Переведенцевым [10].

Режим подземных вод главным образом в естественных, а иногда нарушенных условиях для южных

территорий объекта исследований (в границах Томской области) достаточно продолжительно и детально изучался и изучается по ныне Томскими учеными: Ю.В. Макушиным [11], В.А. Лыготиним [12], О.Г. Савичевым [11, 12], А.А. Балобаненко [13–15], Е.М. Дутовой, К.К. Кузевановым и К.И. Кузевановым [16, 17], В.А. Зуевым [18] и многими другими.

Не оставляют без внимания исследование режима подземных вод и иностранные ученые. Изучению связи подземных вод с климатическими особенностями посвящены работы иностранных ученых: А.И. Shiklomanov, R.B. Lammers, D.P. Lettenmaier [19–21], А.С. Amanambu, О.А. Obarein, J. Mossa, R. Barthel, S. Banzhaf, D. Yang, F. Sun [22–26]. Связь поверхностных вод крупных рек и водоносных горизонтов описывали в своих работах D. Li, M. Pan [27], K. Kubiak-Wójcicka [28], L. Li, J. Ni, F. Chang, Y. Yue [29]. Глобальные закономерности и динамика воздействия климата на грунтовые воды изучались А.С., Amanambu О.А. Obarein, J. Mossa [30], М.О. Cuthbert, T. Gleeson и др [31, 32].

Настоящая работа является продолжением исследований в данном направлении. Её цель заключается в анализе многолетнего режима подземных вод четвертичных отложений для оценки характера и тенденций сезонных изменений на территории юго-восточной части Иртыш-Обского артезианского бассейна.

Характеристика объекта исследования

Объект исследования данной работы – подземные воды четвертичных отложений, которые приурочены к верхнему гидрогеологическому этажу, являющемуся зоной интенсивного водообмена в пределах Иртыш-Обского артезианского бассейна II порядка, юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна I порядка (рис. 1).

Прежде всего основные закономерности формирования подземных вод четвертичных отложений определяют ландшафтно-климатические факторы (рис. 2), дренирующее воздействие местной эрозионной и речной сети и литофациальные особенности водоносных отложений.

Южная часть Западно-Сибирской низменности характеризуется ярко выраженным континентальным климатом с продолжительной холодной зимой и коротким сравнительно жарким летом. Климат формируется под влиянием атлантических циклонов, приносящих влагу, и обширных континентальных пространств, обеспечивающих высокую повторяемость антициклональной погоды, интенсивную трансформацию воздушных масс в летние и зимние сезоны года.

В границах исследуемой территории выражена широтная зональность в распределении атмосферных осадков и тепловых потоков. Среднегодовая температура воздуха по данным многолетних наблюдений изменяется в пределах от $-3,1$ °С на севере (Александровское) до $2,5$ °С (Змеиногорск), что находит отражение в ландшафтно-климатическом районировании территории (рис. 2). Годовая сумма атмосферных осадков изменяется от 650 мм в зоне тайги до 500 мм в лесной зоне и уменьшается до 350–400 мм в зоне степей. Максимальная интенсивность осадков отме-

чается на Алтае (до 900 мм/год), а минимум приходится на территории Прииртышья.

Распределение годового количества осадков по сезонам не испытывает заметных колебаний. Максимальное количество атмосферной влаги выпадает с мая по октябрь, что достигает 70–75 % от годовой суммы. На холодный период, с ноября по март, приходится лишь 25–30 % годового количества осадков.

Северная часть территории относится к зоне с достаточным увлажнением (до 650 мм), центральная характеризуется умеренным увлажнением (от 350–400 до 500 мм), а южная относится к засушливой зоне с недостаточным увлажнением (<350 мм).

Интенсивность атмосферных осадков определяет величину питания подземных вод, поэтому величина подземного стока имеет черты ярко выраженной широтной зональности. В особенности это характерно для крайней южной части бассейна, где питание подземных вод определяет соотношение суммы осадков и величины возможного суммарного испарения.

Территория исследования приурочена к провинции с устойчивым сезонным промерзанием зоны аэрации. Здесь основное питание грунтовых вод осуществляется в весенний период за счет снеготаяния.



Рис. 1. Схема района исследования

Fig. 1. Scheme of the study area

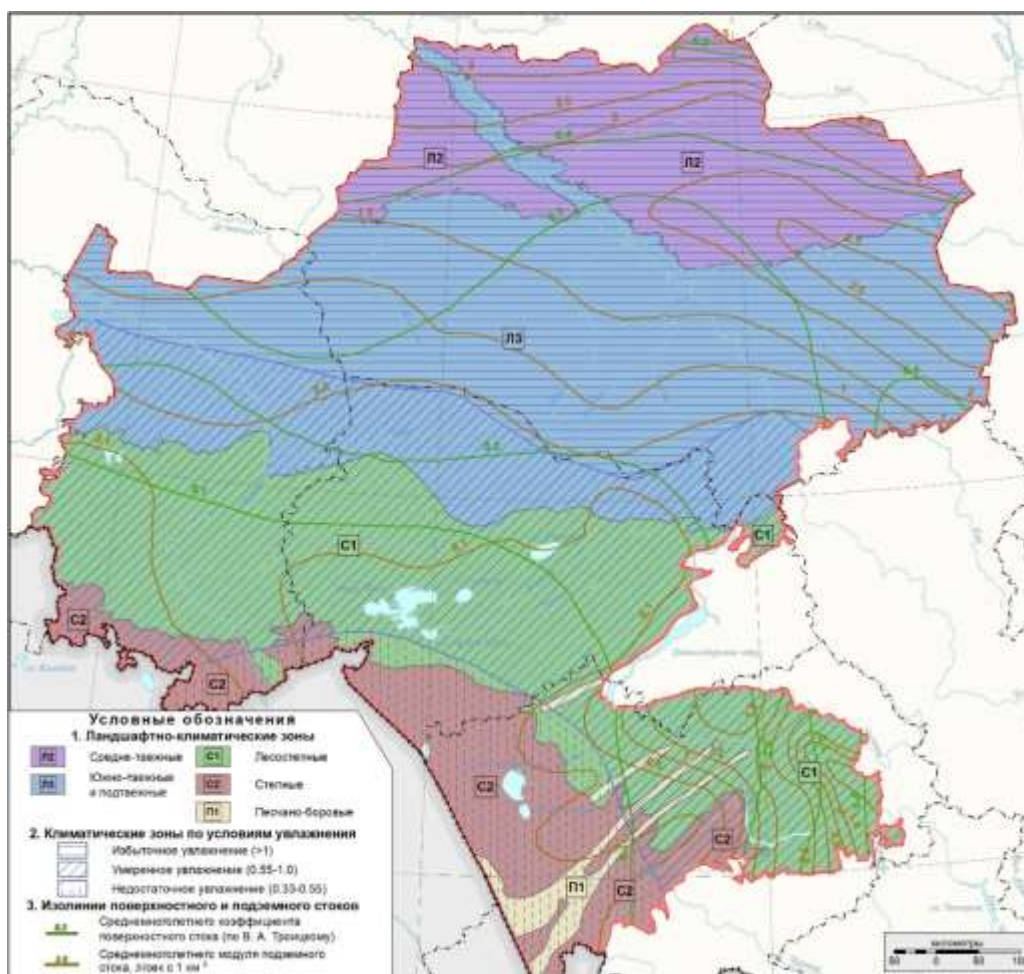


Рис. 2. Ландшафтно-климатическое районирование территории

Fig. 2. Landscape and climatic zoning of the territory

На приподнятых участках междуречных пространств благодаря инфильтрации атмосферных осадков в большей степени происходит питание подземных вод верхней части гидрогеологического разреза. В частности, это свойственно для правобережья р. Оби с характерным песчаным разрезом, приподнятостью территории, отсутствием выдержанных в пространстве водоупоров. Зона недостаточного и умеренного увлажнения, расположенная на юге территории бассейна, характеризуется питанием подземных вод, преимущественно при таянии снега в весенний период и меньше – во время выпадения интенсивных дождей осеннего периода. Поднятие уровня подземных вод при повышении уровня поверхностных вод говорит о том, что поверхностные воды рек во время весеннего паводка в долинах и в придолинных частях рек дополнительно питают подземные воды. В местных понижениях рельефа и по долинам рек происходит дренирование первых от поверхности водоносных горизонтов.

Гидрографическая сеть, относящаяся к бассейну Карского моря, наиболее развита в зоне тайги и лесной зоне. Мелкая густая речная сеть характерна для лесостепи. Основными водными артериями являются рр. Обь (река I-го порядка), Иртыш, Томь, Чулым, Васюган, Парабель, Тым, Кеть, Шегарка, Омь, Парбиг, Бия, Катунь (реки II-го порядка) и более 1900 их притоков длиной более 50 км.

По характеру питания и водному режиму реки подразделяются на степные, таежные и тундровые с преобладанием снегового типа питания.

Речная сеть таежной зоны и лесной зоны характеризуется сильной извилистостью и малыми уклонами (до 10 см на 1 км), и слабо выраженными в рельефе водоразделами. Густота гидрографической сети составляет 0,34–0,45 км/км². Основным источником питания рек являются зимние осадки. Большинство рек, на которых в весенний период происходит затопление поймы на севере, относится к таёжному типу. На территории водосборных бассейнов повсеместно распространены болота.

В лесостепной зоне гидрографическая сеть представлена транзитными участками крупных рек или маловодными и мелкими реками. Густота речной сети составляет 0,1–0,2 км/км². На междуречье рр. Оби и Иртыша располагаются области замкнутого стока, внутри которых речная сеть развита очень слабо, многие реки теряют сток и пересыхают. Здесь широко развита сеть искусственных, в основном мелких, водохранилищ. Исключением является Новосибирское водохранилище с площадью водной поверхности 1082 км². Реки Приобской лесостепи имеют равнинный характер, течение их спокойное, поймы их широкие, часто заболочены.

Гидрографическая сеть степной части исследуемой территории характеризуется наличием преимущественно временных водотоков, имеющих сток только в период весеннего снеготаяния. Густота сети в среднем менее 0,1 км/км². Рек с постоянным стоком мало. В пределах значительной части степной зоны района исследований водотоки почти отсутствуют. Большинство рек заканчивают свое течение в круп-

ных водоемах или в заболоченных понижениях и мелких степных озерах. Руслу рек мелкие, сильно извилистые, заросшие.

В строении Западно-Сибирского артезианского бассейна выделяются два структурных яруса. Нижний – складчатый палеозойский фундамент с распространенными, в основном в зоне древнего выветривания и тектонических разломов, напорными трещинными и трещинно-жильными водами. Верхний – эпипалеозойский чехол, содержащий напорные, преимущественно, и безнапорные пластово-поровые воды в рыхлых слабоуплотненных осадках кайнозоя и мезозоя. Подземные воды фундамента, залегающего на больших глубинах, не представляют практического интереса для широкого хозяйственного использования.

В разрезе Западно-Сибирского артезианского бассейна пластовых вод выделяется региональный водоупор верхнемел-палеогенового возраста мощностью до 400–800 м, разделяющий водоносную мезозойско-кайнозойскую толщу на два гидрогеологических этажа с резко различными условиями формирования подземных вод. В краевой зоне бассейна, в восточной-юго-восточной части рассматриваемой площади региональный водоупор выклинивается и отложения представляют здесь единую водоносную толщу.

Условия формирования подземных вод ЗСАБ своеобразные и довольно сложные. В региональном плане территория ЗСАБ относится к зоне активного водообмена и транзита подземных вод в более глубокие части бассейна в северо-западном направлении.

Верхняя гидродинамическая зона (этаж) интенсивного водообмена охватывает водоносные комплексы, подземный сток которых формируется под дренирующим воздействием местной эрозийной и речной сети.

Характер распределения интенсивности подземного стока зоны интенсивного водообмена в целом определяется климатическими особенностями, геоморфологическими условиями, литолого-фациальным строением водовмещающих толщ и структурно-гидрогеологическими условиями.

Климат придает распределению величин подземного стока черты ярко выраженной широтной зональности, т. к. величина питания подземных вод определяется количеством атмосферных осадков, особенно в крайней южной части бассейна, где возможность питания подземных вод определяется соотношением суммы осадков и величины возможного суммарного испарения.

Зональность распределения интенсивности подземного стока проявляется наиболее четко при переходе от зоны недостаточного увлажнения к зонам умеренного и избыточного увлажнения. В зоне недостаточного увлажнения характерно уменьшение величины подземного стока, что связано с сокращением количества осадков и уменьшением степени эрозийной расчлененности рельефа.

Водоносные горизонты четвертичных отложений по степени водообильности разделяют на две группы: относящиеся к участкам водораздельных равнин и к долинам рек Оби, Иртыша и их крупных притоков. Неоднородность литологического состава и различная

степень глинистости водовмещающих пород влияет на изменение водообильности отложений, которые распространены в пределах водораздельных равнин. С понижением уровня на 1–5 м происходит изменение удельных дебитов скважин от сотых и десятых долей л/с до 1,8 л/с. Высокая и неоднородная водообильность характерна для водоносных горизонтов аллювиальных отложений долин рек. Удельные дебиты скважин изменяются от десятых долей л/с до 3–4 л/с и более.

Подземные воды четвертичных отложений артезианского бассейна играют значительную роль в развитии региона. Для децентрализованного водоснабжения мелких потребителей используют водоносные горизонты неглубокого залегания, для организации центрального водоснабжения населенных пунктов предпочтение отдается подземным водам высоко водообильных террасовых отложений.

Характеристика фактического материала и методики исследования

Исходной информацией для проведения исследований послужили данные, полученные с середины 1960-х по 1995 г. Томской геологоразведочной экспедицией (ГПРЭ), а с 1996 по 2022 г. – предприятием ООО «Томскгеомониторинг» (Филиал «Сибирский региональный центр ГМСН» ФГБУ «Гидроспецгеология» в настоящее время) на режимных скважинах государствен-

ной опорной наблюдательной сети в рамках ведения мониторинга геологической среды на территории СФО. Выбор пунктов наблюдений осуществлялся исходя из однородности и продолжительности рядов данных, наличия в них пропусков, отсутствия явно выраженного антропогенного воздействия на подземные воды. В первую очередь обращалось внимание на уровенный режим наиболее распространенных на рассматриваемой территории водоносных отложений четвертичного возраста.

Методика ведения наблюдений за уровнями подземных вод в течение всего периода принципиально не менялась. Обработка данных многолетних наблюдений включала расчет средних, минимальных и максимальных значений положения уровней в многолетнем плане, по годам и сезонам года; визуальный и статистический анализ полученных рядов данных.

Полученные результаты сопоставлялись с данными о водном режиме рек и климатических характеристиках, в той или иной мере связанных с исследуемыми подземными водами.

Сеть режимных гидрогеологических скважин на подземные воды четвертичных отложений в границах изучаемой территории представлена 305-ю наблюдательными пунктами (56 действующих). Они приурочены к различным ландшафтно-климатическим зонам и типам режима подземных вод (рис. 3).

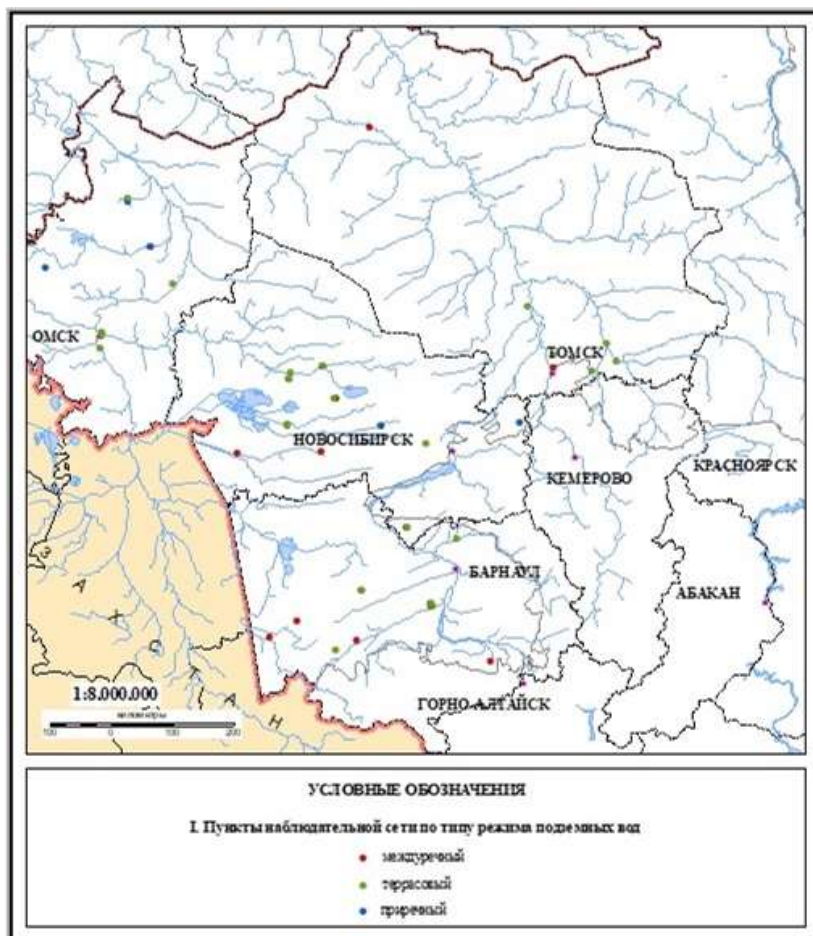


Рис. 3. Карта расположения действующих наблюдательных пунктов
Fig. 3. Map of the location of active observation posts

За многолетний период наблюдений накоплен обширный фактический материал, представляющий собой базу данных о замерах уровней подземных вод в наблюдательных пунктах (около 130 тысяч замеров) (таблица).

Таблица. Особенности гидродинамического режима подземных вод изучаемой территории

Table. Features of the hydrodynamic regime of groundwater in the study area

Тип режима Mode type	Кол-во ПН Number of OP	Кол-во замеров Number of measurements	Период наблюдения Observation period	Глубина до уровня подзем- ных вод, м Depth to groundwater level, m	Амплитуда колеба- ния уровней, м Level fluctuation amplitude, m
				мин-макс/min-max сред./avg.	
Приречный режим Riverside mode	135	51190	1978–2022	<u>3,73–5,08</u> 4,43	0,6–2,51
Террасовый режим Terrace mode	100	42041	1966–2022	<u>6,57–19,09</u> 12,02	0,23–2,7
Междуречный режим Interfluve mode	70	36698	1964–2022	<u>3,59–41,18</u> 16,01	0,31–2,45

Результаты исследования и их обсуждение

Естественный режим подземных вод характеризуется соотношением многолетней и внутригодовой амплитуды распределения уровней, синхронностью воздействия климатических и гидрологических факторов, зависимостью амплитуды хода уровней от мощности зоны аэрации для грунтовых вод и глубины залегания для напорных водоносных горизонтов.

Режим подземных вод отложений четвертичного возраста в наибольшей степени зависит от влияния климатических и гидрологических факторов. Максимальная вариативность уровней подземных вод находит отражение в приречном типе режима. Анализ многолетней изменчивости хода уровней подземных вод по данным режимных наблюдений показывает, что приречный тип режима наиболее ярко проявляется на участках развития водоносных горизонтов, приуроченных к пойменным отложениям рек Оби, Иртыша и их наиболее крупных притоков.

Характерные особенности хода уровней подземных вод для основных типов их гидродинамического режима в условиях различной степени увлажнения территории показаны в таблице.

В условиях приречного типа режима грунтовые воды испытывают влияние гидрологического режима постоянно действующих поверхностных водотоков, что опосредованно отражает выраженное влияние атмосферных осадков и интенсивности инфильтрационного питания на территории водосборного бассейна. Это подтверждается графиками режимных наблюдений на ключевых участках, имеющих гидрогеологические скважины с наиболее полными рядами наблюдений (таблица, рис. 4).

В годовом изменении уровней подземных вод отчетливо прослеживается весенне-летний пик, обусловленный половодьем и осенние-зимний минимум, отвечающий периоду затухания инфильтрационного питания.

Подъем уровня подземных вод формируется не только за счёт непосредственного влияния роста уровня поверхностных вод, гидравлически связанных с водоносными горизонтами во время паводка, но и под влиянием прекращения разгрузки подземных вод за счёт развития явления подпора. Такие процессы сопровождаются сокращением интенсивности раз-

грузки подземных вод (вплоть до её полного прекращения) в результате берегового регулирования запасов грунтовых вод при временной инверсии направления фильтрационных потоков от русла в сторону междуречных массивов.

Весенний максимум уровня подземных вод резко превышает амплитуду более мелких пиков летне-весеннего периода, связанных с инфильтрацией атмосферных осадков в течение сезона положительных температур атмосферного воздуха.

Террасовой тип режима подземных вод проявляется на пространствах развития надпойменных террас (и в толще подстилающих отложений четвертичного возраста при отсутствии разделяющих водоупоров) рек Оби, Иртыша и их наиболее крупных притоков.

В условиях террасового типа режима подземных вод ослабевает гидродинамическая связь с поверхностными водотоками. В приходной части водного баланса, наряду с инфильтрацией атмосферных осадков, возрастает роль бокового притока со стороны прилегающих склонов и междуречных пространств. Внутригодовая динамика хода уровней подземных вод имеет характер, сходный с особенностями приречного режима, но отличается меньшей амплитудой пиков во время половодья и плавным переходом в осенне-зимнюю межень.

Междуречный тип режима подземных вод характерен для водораздельных пространств. На этих участках в питании подземных вод возрастает роль инфильтрации атмосферных осадков, интенсивность которых зависит от мощности и литологического состава пород зоны аэрации.

В зависимости от глубины залегания подземных вод междуречный тип режима можно подразделить на две разновидности, отличающиеся условиями питания подземных вод и расходом их запасов на испарение.

Первая разновидность междуречного режима характеризуется глубоким залеганием уровня подземных вод, слабой связью (или полным отсутствием связи) с поверхностью, что обусловлено наличием в разрезе прослоев суглинков и глин.

Мощность зоны аэрации здесь превышает 4 м. Амплитуда внутригодового колебания уровней подземных вод невелика, а наблюдаемые пики имеют сглаженную форму. Такой вид графиков режимных наблюдений

обусловлен затруднённым характером инфильтрационного питания, преодолевающего относительно мощную

зону аэрации, которая сглаживает неравномерность вертикального инфильтрационного потока.

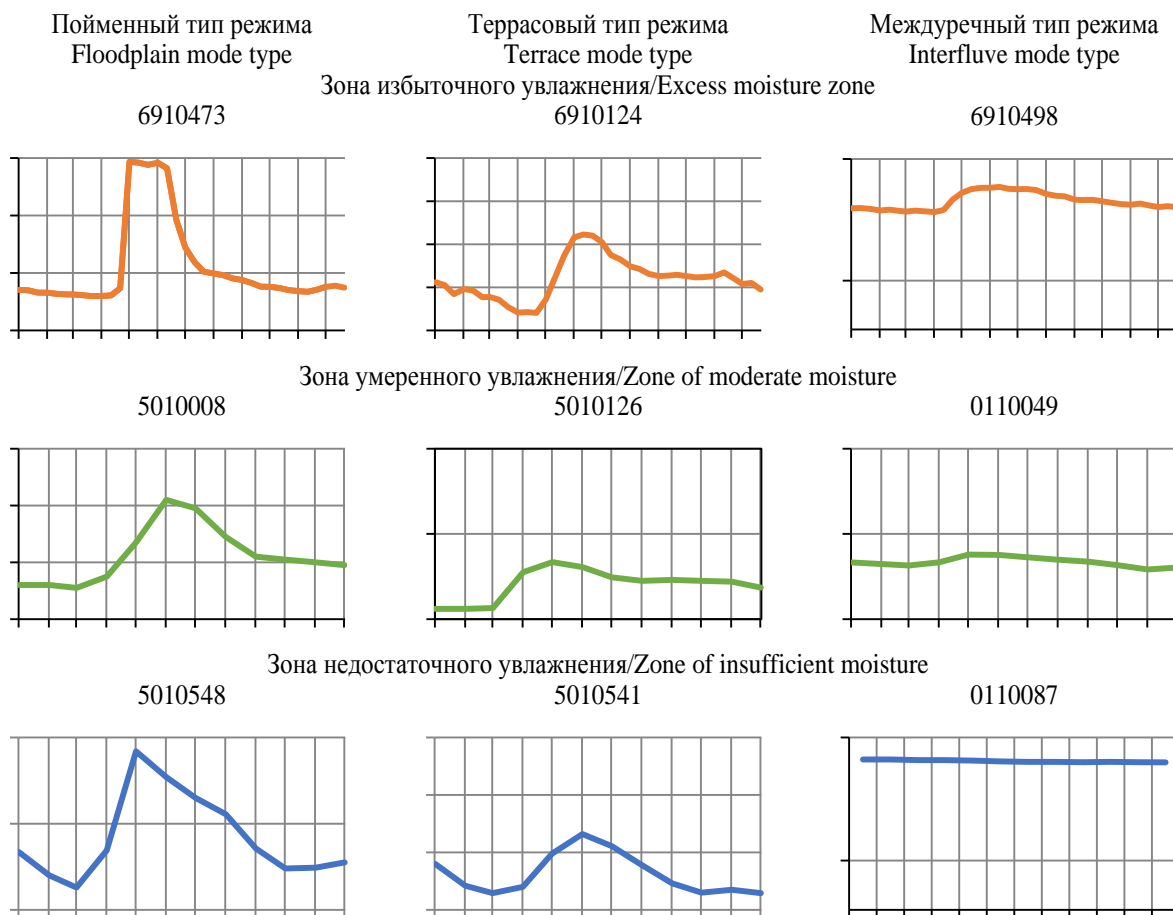


Рис. 4. Типовые графики уровней подземных вод в годовом цикле по типам режима и в зависимости от степени питания подземных вод

Fig. 4. Typical graphs of groundwater levels in the annual cycle by mode types and depending on the degree of groundwater recharge

Вторая разновидность междуречного режима характеризуется неглубоким залеганием подземных вод и более тесной связью с поверхностью, что облегчает питание грунтовых вод за счёт поступления инфильтрации атмосферных осадков. Это отражается наличием выраженных пиков на графиках внутригодового колебания уровней, синхронизированных с периодами выпадения атмосферных осадков.

Все выделенные типы режима подземных вод четвертичных отложений имеют общую тенденцию некоторого роста уровней за многолетний период наблюдений, которая отчётливо прослеживается по средним, максимальным и минимальным значениям (рис. 5).

Наиболее отчётливо тенденция роста уровней подземных вод проявляется в пределах междуречных пространств. Здесь наиболее активно проявляется влияние климатического фактора на режим подземных вод. На этих участках влияние многолетних изменений климатического фактора на режим подземных вод является наиболее выраженным. Другой осо-

бенностью режима является большой разброс частных значений уровней подземных вод на участках водоразделов как в летний сезон, так и в период осенних минимумов (рис. 6).

Заключение

На основе обобщения данных многолетних режимных наблюдений за период с 1990 по 2022 гг. рассмотрены особенности изменения уровней подземных вод четвертичных отложений. Показано, что особенностью уровня режима является тесная связь с климатическими факторами и их многолетней изменчивостью. Установлено, что минимальная многолетняя изменчивость уровней подземных вод приходится на зимний сезон, а максимальная характерна для осеннего периода. Выявлен тренд устойчивого роста среднегодовых положений уровней подземных вод. Отмеченная тенденция не противоречит результатам исследований климатических изменений территории России Ю.П. Переведенцева [26] в конце XX и начале XXI вв.

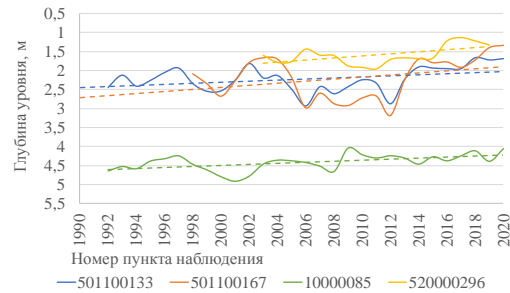
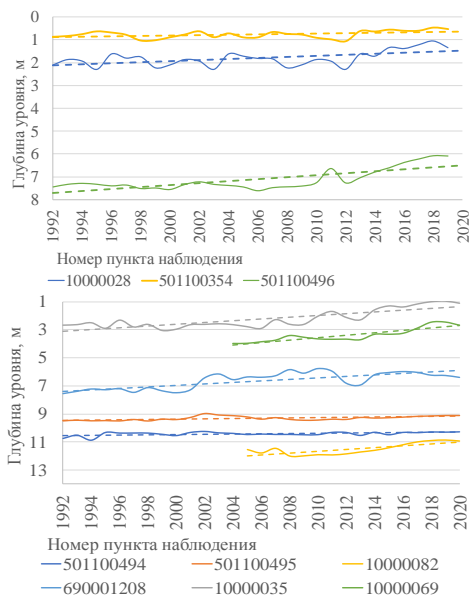


Рис. 5. Многолетняя изменчивость уровенного режима подземных вод по типам режима

Fig. 5. Long-term variability of the groundwater level regime by mode types

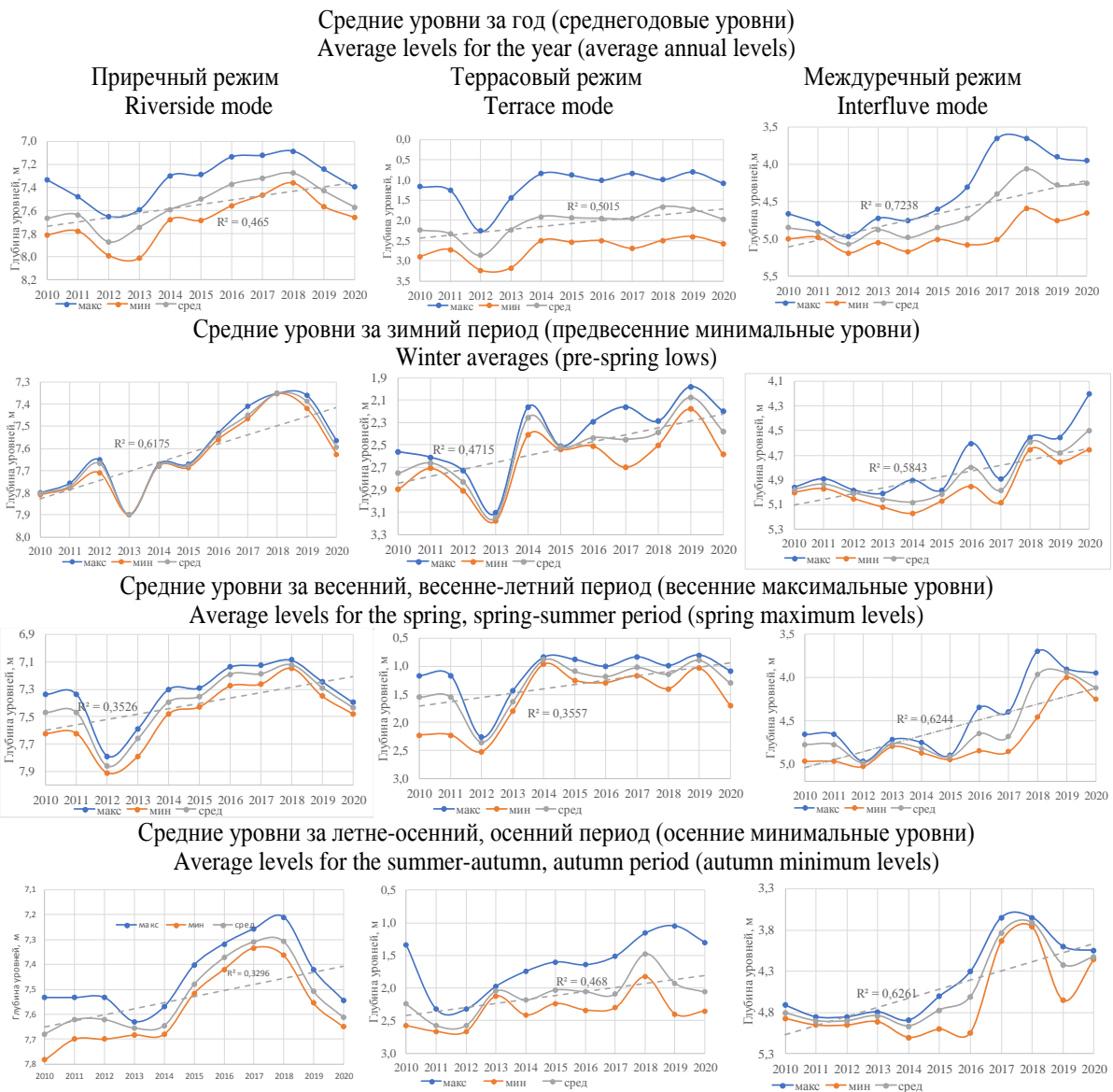


Рис. 6. Многолетняя изменчивость уровенного режима подземных вод по типам режима и гидрологическим сезонам
 Fig. 6. Long-term variability of the groundwater level regime by mode types and hydrological seasons

Выявленные закономерности гидродинамического состояния подземных вод формируются в основном под влиянием климатических условий и их многолетней изменчивости. Наиболее интенсивное влияние естественных режимобразующих факторов испытывают грунтовые воды в зоне приречного режима и на участках неглубокого залегания уровня. Интенсивность влияния климатических факторов ослабевает с увеличением глубины залегания подземных вод и с удалением от долин поверхностных водотоков. Результаты ретроспективного анализа данных режимных наблюдений могут быть положены в основу прогноза поведения уровня подземных вод на ближайшую перспективу. В практическом плане выявленная многолетняя тенденция некоторого роста уровней подземных вод может приводить к разнонаправленным последствиям. Очевидно положительное влияние прироста уровня на увеличение естественных запасов и ресурсов подземных вод. С другой стороны, рост уровней может приводить и к негативным по-

следствиям, связанным с развитием процессов подтопления освоенных территорий.

Таким образом, изучение закономерностей сезонной и многолетней изменчивости режима подземных вод позволило установить наличие многолетнего тренда, обусловленного влиянием естественных факторов. Выделены типовые участки проявления приречного типа режима подземных вод, характеристики которого позволяют показать проявление тесной взаимосвязи поверхностных и подземных вод. Полученные количественные характеристики выделенных типов режима подземных вод позволяют оценить и обосновать возможность наращивания коротких рядов наблюдений по корреляционным связям с гидрометеорологическими параметрами.

Данные многолетних наблюдений могут быть востребованы при разработке гидрогеологических моделей, создаваемых для региональных оценок запасов подземных вод и учёта возможных их изменений во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каменский Г.Н. Гидродинамические принципы изучения режима грунтовых вод // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. – М.: Госгеолгиздат, 1953. – С. 4–13.
2. Ланге О.К. О зональном распределении грунтовых вод на территории СССР // Материалы к познанию геологического строения СССР. – 1947. – № 8. – С. 28–42.
3. Альтовского М.Е., Коноплянцева А.А. Методическое руководство по изучению режима подземных вод. – М.: Изд-во литературы по геологии и охране недр, 1954. – 196 с.
4. Киселев П.А. Исследование баланса грунтовых вод по колебаниям их уровня. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 202 с.
5. Лебедев А.В. Опыт статистической обработки результатов многолетнего наблюдения за режимом грунтовых вод // Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод. Новая серия. – 1964. – № 10. – С. 64–73.
6. Ковалевский В.С. Условия формирования и прогноза естественного режима подземных вод. – М.: Недра, 1973. – 152 с.
7. Гринеvский С.О., Спорышев В.С. Особенности формирования балансовой структуры эксплуатационного отбора подземных вод и его влияния на речной сток при снижении уровней грунтовых вод // Водные ресурсы. – 2019. – Т. 46. – № 3. – С. 247–258.
8. Гринеvский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37. – № 5. – С. 543–557.
9. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
10. Климатические изменения на территории России в конце XX начале XXI века / Ю.П. Переведенцев, А.А. Васильев, Б.Г. Шерстюков, К.М. Шанталинский // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 10. – С. 14–26.
11. Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения уровня подземных вод верхней гидродинамической зоны на территории Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 4. – С. 60–63.
12. Савичев О.Г., Лыготин В.А., Моисеева Ю.А. Условия изменения уровня подземных вод верхней гидродинамической зоны на территории Томской области // Геоэкология. – 2018. – № 6. – С. 31–40.
13. Балобаненко А.А. Колебания уровней подземных вод четвертичных отложений в южной и юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск, 2012. – Т. 1. – С. 427–428.
14. Балобаненко А.А. Закономерности уровня режима подземных вод верхней гидродинамической зоны юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск, 2013. – Т. 1. – С. 415–416.
15. Балобаненко А.А., Васильев Д.И., Манухина А.С. Гидродинамический режим подземных вод Иртыш-Обского артезианского бассейна в районе Сибирского федерального округа // Природопользование и охрана природы: охрана памятников природы, биологического и ландшафтного разнообразия Томского Приобья и других регионов России: Материалы IX Всероссийской с международным участием научно-практической конференции. – Томск, 2020. – С. 257–263.
16. Дутова Е.М., Кузеванов К.И., Кузеванов К.К. Гидродинамическое обоснование изменений гидрогеохимических условий Стрелеvского месторождения подземных вод (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 204–220.
17. Dutova E.M. Geochemistry of fresh groundwater in the Altai-Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 5. – P. 120.
18. Зуев В.А., Картаvых О.В., Шварцев С.Л. Химический состав подземных вод томского водозабора // Обской вестник. – 1999. – № 3–4. – С. 69–77.
19. Hydrological changes: historical analysis, contemporary status, and future projections. / A.I. Shiklomanov, R.B. Lammers, D.P. Lettenmaier, Y.M. Polischuk, O.G. Savichev, L.G. Smith // Environmental changes in Siberia: regional changes and their global consequences / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer, 2013. – Ch. 4. – P. 111–154.
20. Manganese release linked to carbonate dissolution during the start-up phase of a subsurface iron removal well in Khabarovsk, Russia / S. Paufler, T. Grischek, J. Feller, J. Herlitzius, V.V. Kulakov // The science of the total environment. – 2019. – V. 650. – P. 1722–1733.
21. A physically based model of a two-pass digital filter for separating groundwater runoff from streamflow time series / S.P. Pozdniakov, P. Wang, S.O. Grinevsky, N.L. Frolova // Water Resources Research. – 2022. – V. 58. – № 3. – С. 35–58.
22. Groundwater system and climate change: present status and future considerations / A.C. Amanambu, O.A. Obarein, J. Mossa, L. Li, S.S. Ayeni, O. Balogun, A. Oyebamij, F.U. Ochege // Journal of Hydrology. – 2020. – V. 589. – P. 1–19.
23. Condon L.E., Atchley A.L., Maxwell R.M. Evapotranspiration depletes groundwater under warming over the contiguous United States // Nature Communications. – 2020. – V. 11. – P. 12–24.
24. Barthel R., Banzhaf S. Groundwater and surface water interaction at the regional-scale – a review with focus on regional integrated models // Water Resources Management. – 2016. – V. 30. – P. 1–32.

25. Using pedotransfer functions in Vadose zone models for estimating groundwater recharge in semiarid regions / T. Wang, V.A. Zlotnik, J. Šimůnek, M.G. Schaap // Water Resources Research. – 2009. – V. 45. – № 4. – P. 1–12.
26. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis / D. Yang, F. Sun, Z. Liu, Z. Cong, G. Ni, Z. Lei // Water Resources Research. – 2007. – V. 43. – № 4. – P. 1–12.
27. Vegetation control on water and energy balance within the Budyko framework / D. Li, M. Pan, Z. Cong, L. Zhang, E. Wood // Water Resources Research. – 2013. – V. 49. – № 2. – P. 969–976.
28. Kubiak-Wójcicka K. Variability of air temperature, precipitation and outflows in the Vistula Basin (Poland) // Resources. – 2020. – V. 9. – P. 1–26.
29. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers / L. Li, J. Ni, F. Chang, Y. Yue, N. Frolova, D. Magritsky, A.G.L. Borthwick, P. Ciais, Y. Wang, C. Zheng // Science Bulletin. – 2020. – V. 65. – P. 62–69.
30. Groundwater system and climate change: present status and future considerations / A.C. Amanambu, O.A. Obarein, J. Mossa, L. Li, S.S. Ayeni, O. Balogun, A. Oyebamiji, F.U. Ochege // Journal of Hydrology. – 2020. – V. 589. – P. 1–24.
31. Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions / M.O. Cuthbert, T. Gleeson, N. Moosdorf, K.M. Befus, A. Schneider, J. Hartmann, B. Lehner // Nature Climate Change. – 2019. – V. 9. – P. 137–141.
32. Hillslope hydrology in global change research and Earth system modeling / Y. Fan, M. Clark, D.M. Lawrence, S. Swenson, L.E. Band, S.L. Brantley, P.D. Brooks, W.E. Dietrich, A. Flores, G. Grant // Water Resources Research. – 2019. – V. 55. – № 2. – P. 1737–1772.

Поступила: 23.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 01.03.2023 г.

Информация об авторах

Балобаненко А.А., кандидат геолого-минералогических наук, начальник отделения государственного мониторинга состояния недр, филиал «Сибирский региональный центр государственного мониторинга состояния недр», Федеральное Государственное Бюджетное учреждение «Гидроспецгеология».

Васильев Д.И., аспирант Национального исследовательского Томского государственного университета.

Дутова Е.М., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кузеванов К.И., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.332.52

ANALYSIS OF CHANGES IN GROUNDWATER LEVELS IN QUATERNARY DEPOSITS IN THE SOUTH-EASTERN PART OF THE IRTYSH-OB ARTESIAN BASIN

Andrey A. Balobanenko¹,
baa@sfo.geomonitoring.ru

Denis I. Vasilyev²,
vaslev_h@mail.ru

Ekaterina M. Dutova³,
dutova@tpu.ru

Konstantin I. Kuzevanov³,
kki@tpu.ru

¹ Branch «Siberian Regional Center for State Monitoring of the State of the Subsoil», «Gidrospetsgeologia», 99, Nikitin street, Tomsk, 634050, Russia.

² National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. The tasks of studying the level regime of groundwater are very closely related to the need to predict their resources under the influence of both natural and artificial factors in order to develop scientific foundations for the rational use of water resources and effective management of the groundwater regime in the study area.

Purpose: to study changes in the level regime of groundwater for domestic and drinking purposes in Quaternary deposits in the south of the West Siberian artesian basin based on the results of long-term regime observations.

Objects: groundwater of the Irtysh-Ob artesian basin of the II order, the southeastern part of the West Siberian artesian basin of the I order, most actively involved in the sphere of anthropogenic activity. The study area is confined to a province with stable seasonal freezing of the aeration zone, where the main groundwater recharge is carried out in the spring due to snowmelt.

Methods. The methodology for conducting observations of groundwater levels was determined by the regulations of the former USSR Ministry of Geology, and then the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, this paper presents a statistical processing of time series of observations of groundwater levels and a comparison of the results obtained with the data on the water regime of surface watercourses and climatic characteristics of the study areas.

Results. The leading influence of climatic conditions on the main regularities of the natural hydrodynamic regime of groundwater was revealed. A different degree of intensity of the influence of external factors is shown, expressed by the amplitude of the groundwater level, depending on the type of groundwater regime and the degree of moistening of the territory. Natural factors have the least effect on groundwater as they move away from draining ones and with increasing depth.

Key words:

Groundwater, Quaternary deposits, Irtysh-Ob artesian basin, regime types, seasonal and long-term changes.

REFERENCES

- Kamensky G.N. Gidrodinamicheskie printsipy izucheniya rezhima gruntovykh vod [Hydrodynamic principles of studying the regime of groundwater]. *Voprosy gidrogeologii i inzhenernoy geologii*, 1953. pp. 4–13.
- Lange O.K. O zonalnom raspredelenii gruntovykh vod na territorii SSSR [On the zonal distribution of groundwater on the territory of the USSR]. *Materialy k poznaniyu geologicheskogo stroeniya SSSR*, 1947, no. 8. pp. 28–42.
- Altovsky M.E., Konoplyantseva A.A. *Metodicheskoe rukovodstvo po izucheniyu rezhima podzemnykh vod* [Guidelines for the study of the groundwater regime]. Moscow, Izdatelstvo literatury po geologii i okhrane nedr, 1954. pp. 182–194.
- Kiselev P.A. *Issledovanie balansa gruntovykh vod po kolebaniyam ikh urovnya* [Investigation of the balance of groundwater by fluctuations in their level]. Minsk, Academy of Sciences of the BSSR Publ. house, 1961. 202 p.
- Lebedev A.V. Opyt statisticheskoy obrabotki rezultatov mnogoletnego nablyudeniya za rezhimom gruntovykh vod [Experience of statistical processing of the results of long-term observation of the groundwater regime]. *Voprosy izucheniya i prognoza rezhima podzemnykh vod. Novaya seriya*, 1964, no. 10. pp. 64–73.
- Kovalevsky V.S. *Usloviya formirovaniya i prognoza estestvennogo rezhima podzemnykh vod* [Conditions for the formation and forecast of the natural regime of groundwater]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 152 p.
- Grinevsky S.O., Sporyshev V.S. Features of the formation of the balance structure of the operational withdrawal of groundwater and its impact on river runoff with a decrease in groundwater levels. *Vodnye resursy*, 2019, vol. 46, no. 3, pp. 247–258. In Rus.
- Grinevsky S.O., Pozdnyakov S.P. Principles of regional assessment of groundwater infiltration recharge based on geohydrological models. *Vodnye resursy*, 2010, vol. 37, no. 5, pp. 543–557. In Rus.
- Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i vlagooobmena poverkhnosti sushy s atmosferoy* [Modeling of heat and moisture exchange of the land surface with the atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 327 p.
- Perevedentsev Yu.P., Vasiliev A.A., Sherstyukov B.G., Shantalinsky K.M. Climatic changes in Russia at the end of the 20th and beginning of the 21st centuries. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2021, no. 10, pp. 14–26. In Rus.
- Savichev O.G., Makushin Yu.V. Long-term changes in groundwater levels in the upper hydrodynamic zone on the territory of the

- Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 4, pp. 60–63. In Rus.
12. Savichev O.G., Lgotin V.A., Moiseeva Yu.A. Conditions for changing groundwater levels in the upper hydrodynamic zone on the territory of the Tomsk region. *Geoecology*, 2018, no. 6, pp. 31–40. In Rus.
 13. Balobanenko A.A. Kolebaniya urovney podzemnykh vod chetvertichnykh otlozheniy v yuzhnoy i yugo-vostochnoy chasti Zapadno-Sibirskogo artezianskogo basseyna [Fluctuations in groundwater levels of Quaternary deposits in the southern and southeastern parts of the West Siberian artesian basin]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XVI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Problems of Geology and Mineral Development. Proceedings of the XVI International Symposium named after academician M. A. Usov for students and young scientists]. Tomsk, 2012. Vol. 1, pp. 427–428.
 14. Balobanenko A.A. Zakonomernosti urovennoy rezhima podzemnykh vod verkhney gidrodinamicheskoy zony yugo-vostochnoy chasti Zapadno-Sibirskogo artezianskogo basseyna [Patterns of the level regime of groundwater in the upper hydrodynamic zone of the southeastern part of the West Siberian artesian basin]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XVII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Problems of Geology and Mineral Development. Proceedings of the XVII International Symposium named after academician M.A. Usov for students and young scientists]. Tomsk, 2013. Vol. 1, pp. 415–416.
 15. Balobanenko A.A., Vasiliev D.I., Manukhina A.S. Gidrodinamicheskiy rezhim podzemnykh vod Irtysh-Obsskogo artezianskogo basseyna v rayone Sibirskogo federalnogo okruga [Hydrodynamic regime of groundwater of the Irtysh-Ob artesian basin in the area of the Siberian Federal District]. *Prirodopolzovanie i okhrana prirody: okhrana pamyatnikov prirody, biologicheskogo i landshaftnogo raznoobraziya Tomskogo Priobya i drugih regionov Rossii. Materialy IX Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Nature management and conservation: protection of natural monuments, biological and landscape diversity of the Tomsk Ob region and other regions of Russia. Proceedings of the IX All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Tomsk, 2020. pp. 257–263.
 16. Dutova E.M., Kuzevanov K.I., Kuzevanov K.K. Hydrodynamic substantiation of changes in the hydrogeochemical conditions of the Strezhevsky groundwater deposit (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 9, pp. 204–220. In Rus.
 17. Dutova E.M. Geochemistry of fresh groundwater in the Altai-Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 5, pp. 120.
 18. Zuev V.A., Kartavykh O.V., Shvartsev S.L. Chemical composition of groundwater of the Tomsk water intake. *Obskoy vestnik*, 1999, no. 3–4, pp. 69–77. In Rus.
 19. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Y.M., Savichev O.G., Smith L.G. Hydrological changes: historical analysis, contemporary status, and future projections. *Environmental changes in Siberia: regional changes and their global consequences*. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer, 2013. Ch. 4, pp. 111–154.
 20. Paufler S., Grischek T., Feller J., Herlitzius J., Kulakov V.V. Manganese release linked to carbonate dissolution during the start-up phase of a subsurface iron removal well in Khabarovsk, Russia. *The science of the total environment*, 2019, vol. 650, pp. 1722–1733.
 21. Pozdniakov S.P., Wang P., Grinevsky S.O., Frolova N.L. A physically based model of a two-pass digital filter for separating groundwater runoff from streamflow time series. *Water Resources Research*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 35–58.
 22. Amanambu A.C., Obarein O.A., Mossa J., Li L., Ayeni S.S., Balogun O., Oyebamiji A., Ochege F.U. Groundwater system and climate change: present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, 2020, vol. 589, pp. 1–19.
 23. Condon L.E., Atchley A.L., Maxwell R.M. Evapotranspiration depletes groundwater under warming over the contiguous United States. *Nature Communications*, 2020, vol. 11, pp. 12–24.
 24. Barthel R., Banzhaf S. Groundwater and surface water interaction at the regional-scale – a review with focus on regional integrated models. *Water Resources Management*, 2016, vol. 30, pp. 1–32.
 25. Wang T., Zlotnik V.A., Šimůnek J., Schaap M.G. Using pedo-transfer functions in Vadose zone models for estimating groundwater recharge in semiarid regions. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 1–12.
 26. Yang D., Sun F., Liu Z., Cong Z., Ni G., Lei Z. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in non-humid regions of China using the Budyko hypothesis. *Water Resources Research*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 1–12.
 27. Li D., Pan M., Cong Z., Zhang L., Wood E. Vegetation control on water and energy balance within the Budyko framework. *Water Resources Research*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 969–976.
 28. Kubiak-Wójcicka K. Variability of air temperature, precipitation and outflows in the Vistula Basin (Poland). *Resources*, 2020, vol. 9, pp. 1–26.
 29. Li L., Ni J., Chang F., Yue Y., Frolova N., Magritsky D., Borthwick A.G.L., Ciais P., Wang Y., Zheng C. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers. *Science Bulletin*, 2020, vol. 65, pp. 62–69.
 30. Amanambu A.C., Obarein O.A., Mossa J., Li L., Ayeni S.S., Balogun O., Oyebamiji A., Ochege F.U. Groundwater system and climate change: present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, 2020, vol. 589, pp. 1–24.
 31. Cuthbert M.O., Gleeson T., Moosdorf N., Befus K.M., Schneider A., Hartmann J., Lehner B. Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions. *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, pp. 137–141.
 32. Fan Y., Clark M., Lawrence D.M., Swenson S., Band L.E., Brantley S.L., Brooks P.D., Dietrich W.E., Flores A., Grant G. Hillslope hydrology in global change research and Earth system modeling. *Water Resources Research*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 1737–1772.

Received: 23 January 2023.

Reviewed: 1 March 2023.

Information about the authors

Andrey A. Balobanenko, Cand. Sc., head of the Department of State Monitoring of the State of the Subsoil, branch «Siberian Regional Center for State Monitoring of the State of the Subsoil» of the Federal State Budget Institution «Gidrospetsgeologia».

Denis I. Vasilyev, postgraduate student, National Research Tomsk State University.

Ekaterina M. Dutova, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Konstantin I. Kuzevanov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.