

УДК 502/504:556.18(470.345)  
DOI 10.17513/use.38278

## ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ГРУНТОВЫХ ВОД В ПОЙМЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ИНСАР

Масляев В.Н., Маскайкин В.Н., Амирова Д.А., Чичкина Н.А.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет  
имени Н.П. Огарёва», Саранск, e-mail: Maslyaevvn1960@mail.ru

Статья посвящена вопросам взаимодействия поверхностных и грунтовых вод в пойменных ландшафтах. Актуальность темы исследования определяется тем, что поверхностные и грунтовые воды являются важнейшими компонентами любого пойменного ландшафта. Они во многом определяют его морфологическую структуру и процессы функционирования. Цель исследования – анализ взаимосвязи поверхностных и грунтовых вод, создание математической модели, описывающей их взаимодействие для обоснованного решения локальных геоэкологических проблем. Использованы общенаучные, картографические и специальные полевые гидрологические и гидрогеологические методы исследования. Выявлены основные режимообразующие факторы и годовая динамика грунтовых и поверхностных вод. Режим выпадения атмосферных осадков главным образом определяет динамику как грунтовых, так и речных вод. Авторами на основе данных экологического мониторинга произведена оценка взаимосвязи поверхностных и грунтовых вод. Для количественной оценки взаимосвязи грунтовых вод и поверхностных вод р. Инсар был рассчитан коэффициент линейной корреляции Пирсона. В ходе исследования проведен анализ данных за маловодный год (2010 г.), средневодные годы (2019–2023 гг.) и многоводный год (2012 г.). Результаты исследования могут быть использованы для организации мониторинга грунтовых вод и планирования природоохранных мероприятий в пойменных ландшафтах.

**Ключевые слова:** грунтовые воды, река, пойменный ландшафт, геоэкологическое состояние, математическая модель

## ASSESSMENT OF THE RELATIONSHIP BETWEEN SURFACE AND GROUNDWATER IN FLOODPLAIN LANDSCAPES OF THE MIDDLE REACHES OF THE INSAR RIVER

Maslyaev V.N., Maskaykin V.N., Amirova D.A., Chichkina N.A.

Ogarev National Research Mordovia State University, Saransk, e-mail: Maslyaevvn1960@mail.ru

The article is devoted to the interaction of surface and groundwater in floodplain landscapes. The relevance of the research topic is determined by the fact that surface and groundwater are the most important components of any floodplain landscape. They largely determine its morphological structure and functioning processes. The purpose of the study is to analyze the relationship between surface and groundwater, to create a mathematical model describing their interaction for the reasonable solution of local geoecological problems. General scientific, cartographic and special field hydrological and hydrogeological research methods were used. The study revealed the main regime-forming factors and the annual dynamics of groundwater and surface waters. The precipitation regime mainly determines the dynamics of both groundwater and river waters. The authors assessed the relationship between surface and groundwater based on environmental monitoring data. To quantify the relationship of groundwater to surface waters of the river The Pearson linear correlation coefficient was calculated by Insar. The study analyzed data for a low-water year (2010), medium-water years (2019–2023) and a high-water year (2012). The results of the study can be used to organize groundwater monitoring and planning environmental protection measures in floodplain landscapes.

**Keywords:** groundwater, river, floodplain landscape, geoecological condition, mathematical model

Изучение взаимосвязи поверхностных и грунтовых вод (ГВ) позволяет решить ряд важных эколого-хозяйственных задач. Наиболее часто такие задачи решают при гидромелиоративном и градостроительном освоении пойменных ландшафтов, а также при разработке природоохранных мероприятий [1]. Особый интерес представляет разработка математической модели взаимосвязи поверхностных и грунтовых вод [2–4].

Объект исследования – пойменный ландшафт среднего течения р. Инсар (длина реки 168 км, площадь бассейна 3860 км<sup>2</sup>),

притока р. Волга третьего порядка. Выбор объекта исследования обусловлен его типичными природно-ландшафтными и геоэкологическими условиями, а также практической потребностью. В настоящее время район активно осваивается и нуждается в эффективных решениях по устойчивому водопользованию.

Цель исследования – анализ взаимосвязи поверхностных вод и ГВ, создание математической модели, описывающей их взаимодействие, для обоснованного решения локальных геоэкологических проблем.

### Материалы и методы исследования

Одним из основных геоэкологических процессов в пойменном ландшафте является водообмен поверхностных и подземных вод [5]. Он включает такие аспекты, как движение потоков грунтовых вод в зоне аэрации, разгрузка грунтовых вод в русло реки, процессы подтопления во время весеннего половодья и летне-осенних паводках на реке.

Взаимодействие поверхностных и ГВ в ландшафте происходит в виде гидравлической связи. Можно выделить четыре варианта такой связи: постоянная односторонняя, постоянная двусторонняя, временная и отсутствие связи [6]. Постоянная односторонняя гидравлическая связь возникает в том случае, когда река в течение года питает грунтовые воды. Постоянная двусторонняя гидравлическая связь возникает в том случае, когда река питает ГВ в половодье и дренирует их в межень.

Исходными данными для исследования послужили материалы многолетнего экологического мониторинга ГВ на полигоне в пойме р. Инсар, климатические данные метеопоста Мордовского университета. В непосредственной близости от реки расположены семь гидрогеологических наблюдательных скважин. Здесь же на реке расположен гидрологический пост № 75648 Мордовского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал ФГБУ «Верхне-Волжское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (координаты 54.20000, 45.210000, отметка нуля поста – 118,06 м над уровнем Балтийского моря). Измерения глубины залегания ГВ производились гидрогеологической рулеткой ежедекадно, в период половодья – попентадно. В ходе исследования проведен анализ данных за маловодный год (2010 г.), средневодные годы (2019–2023 гг.) и многоводный год (2012 г.)

Гидрогеологические скважины были пробурены ООО «Бурводстрой» (Саранск) в 2009 г. Бурение производилось роторным способом станком 1БА-15В. Диаметр бурения скважины 295 мм, глубина бурения 12 м. Диаметр обсадных труб 159 мм. Конструкция скважин включает три фильтровые секции длиной 1 м, через 1,5 м и отстойник длиной 0,5 м. Фильтр сетчатый. Дно фильтра – глухая пробка. Затрубное пространство отсыпано щебнем. Зацементирован оголовок каждой скважины размером 1х1х0,5 м. Устье каждой скважины закрыто цилиндрическим колпаком на боковых болтовых запорах.

Минерализация воды 0,4–1,5 г/дм<sup>3</sup>. В химическом составе ГВ во всех скважинах преобладают типоморфные для лесостепного ландшафта катионы и анионы. Наблюдательная фильтровая скважина № 1 имеет абсолютную отметку 123,80 м. Высота патрубка 0,38 м. Расстояние до р. Инсар 35 м. Описание пройденных пород: суглинок  $aQ_{IV}$  мощностью 4,0 м, песчаник крепкий  $K_1$  мощностью 1,5 м, глина черная, плотная  $K_1$  мощностью 5,5 м, песчаник  $K_1$  мощностью 0,5 м, глина черная, плотная  $K_1$  мощностью 0,5 м.

Наблюдательная фильтровая скважина № 2 имеет абсолютную отметку 123,83 м. Высота патрубка 0,30 м. Расстояние до р. Инсар 25 м. Описание пройденных пород: суглинок  $aQ_{IV}$  мощностью 4,2 м, песчаник крепкий  $K_1$  мощностью 1,5 м, глина черная, плотная  $K_1$  мощностью 5,3 м, песчаник  $K_1$  мощностью 0,5 м, глина черная, плотная  $K_1$  мощностью 0,5 м.

Наблюдательная фильтровая скважина № 3 имеет абсолютную отметку 125,00 м. Высота патрубка 0,39 м. Расстояние до р. Инсар 45 м. Описание пройденных пород: суглинок  $aQ_{IV}$  мощностью 4,0 м, песчаник крепкий  $K_1$  мощностью 1,5 м, глина черная, плотная  $K_1$  мощностью 5,5 м, песчаник  $K_1$  мощностью 0,5 м, глина черная, плотная  $K_1$  мощностью 0,5 м.

Наблюдательная фильтровая скважина № 4 имеет абсолютную отметку 125,30 м. Высота патрубка 0,36 м. Расстояние до р. Инсар 50 м. Описание пройденных пород: суглинок  $aQ_{IV}$  мощностью 2,0 м, песок крупнозернистый глинистый  $edQ_{II-IV}$  мощностью 6,0 м, глина черная, плотная с прослойками песчаника  $K_1$  мощностью 3,0 м, глина черная, плотная  $K_1$  мощностью 1,0 м.

Наблюдательная фильтровая скважина № 5 имеет абсолютную отметку 124,90 м. Высота патрубка 0,34 м. Расстояние до р. Инсар 48 м. Описание пройденных пород: суглинок  $aQ_{IV}$  мощностью 2,0 м, песок крупнозернистый глинистый  $edQ_{II-IV}$  мощностью 6,0 м, глина черная, плотная с прослойками песчаника  $K_1$  мощностью 3,1 м, глина черная, плотная  $K_1$  мощностью 1,0 м.

Наблюдательная фильтровая скважина № 6 имеет абсолютную отметку 126,10 м. Высота патрубка 0,18 м. Расстояние до р. Инсар 312 м. Описание пройденных пород: черный насыпной грунт  $tQ_{IV}$  мощностью 0,3 м, песок мелкозернистый водонасыщенный  $edQ_{II-IV}$  мощностью 3,7 м, песок крупнозернистый, водонасыщенный  $K_1$  мощностью 2,5 м, песчаник трещиноватый  $K_1$

мощностью 1,5, глина черная, плотная  $K_1$  мощностью 1,0 м.

Наблюдательная фильтровая скважина № 7 имеет абсолютную отметку 125,03 м. Высота патрубка 0,80 м. Расстояние до р. Инсар 311 м. Описание пройденных пород: черный насыпной грунт  $tQ_{IV}$  мощностью 3,0 м, песок мелкозернистый водонасыщенный  $edQ_{II-IV}$  мощностью 4,0 м, песок крупнозернистый, водонасыщенный  $K_1$  мощностью 2,5 м, песчаник трещиноватый  $K_1$  мощностью 1,5, глина черная, плотная  $K_1$  мощностью 1,0 м.

### Результаты исследования и их обсуждение

В районе исследования пойма р. Инсар представляет ровную поверхность, осложненную небольшими микропонижениями и старицами. Вдоль русла реки прослеживается русловой вал. Долина реки трапециевидная, достигает ширины 2,5–3,0 км.

Пойма реки двусторонняя в районе полигона, занимает средний уровень. Пойма покрыта луговой растительностью, частично распаханна. Вдоль реки произрастает древесно-кустарниковая растительность. Русло реки слабоизвилистое, врезается на 3,0–5,0 м в земную поверхность. Берега подвержены процессам береговой эрозии. Дно реки – песчано-глинистое, слой ила достигает 1,0–1,5 м. Ширина русла в межень – 10,0–15,0 м. Глубина реки 0,5–1,0 м, иногда достигает 1,5 м. В летне-осенний период русло реки зарастает водной растительностью. Средняя скорость течения воды 0,34–0,44 м/с, средний расход воды 7,71 м<sup>3</sup>/с [7]. Средний уровень воды в р. Инсар за последние четыре года колебался от 119,83 м (абсолютный минимум) до 126,29 м (абсолютный максимум). Амплитуда колебаний при этом составила 6,46 м.

В пределах исследованной территории залегают породы нижнемелового возраста, перекрытые небольшим чехлом четвертичных отложений, который имеет мощность от 5,8 до 18,6 м. Четвертичные отложения слагают аллювиальные терригенные отложения.

В пределах полигона вскрыт один водоносный горизонт, приуроченный к четвертичным отложениям – современный аллювиальный водоносный горизонт [8]. Средние отметки зеркала ГВ в районе исследования за 2019 г. – 119,46–120,77 м, за 2020 г. – 119,93–121,03 м, за 2021 г. – 120,02–121,87, за 2022 г. – 120,39–122,11 м, за 2023 г. – 120,35–122,46 м. ГВ без напора. Существует их связь с речными водами.

2010 г. характеризовался как маловодный. Среднегодовая температура атмосферного воздуха составила 6,7°C. За год выпало 435,2 мм атмосферных осадков, что значительно меньше среднемноголетней нормы. Летний период отличался высокими среднесуточными температурами (средняя температура июля составила 26,5°C, а августа 23,6°C). При этом в июне-июле выпало лишь 8,6 мм осадков. Самые высокие уровни ГВ отмечены в апреле. Наиболее низкий уровень грунтовых вод (119,04 м) отмечен 15.08.2010 г. в скв. 1 Амплитуда колебания уровня ГВ достигла 5,90 м (скв. 1). Минимум амплитуды колебаний уровня ГВ отмечен в скв. 7 (3,58 м). Запасы ГВ в пойменном ландшафте сократились, средний уровень ГВ в конце года по сравнению с началом года понизился на 15 см.

2012 г. характеризуется как многоводный год. Среднегодовая температура атмосферного воздуха составила 6,1°C. За год выпало 697,2 мм атмосферных осадков, что значительно больше среднемноголетней нормы. Самые высокие уровни ГВ в 2012 г. были отмечены в апреле. Амплитуда колебания уровня ГВ достигла 4,70 м (скв. 2). Минимум амплитуды колебаний уровня ГВ отмечен в скв. 6 (3,73 м). Уровень ГВ в конце года по сравнению с началом года увеличился на 20 см.

Для характеристики средневодного года приводим данные наблюдений 2023 г. Среднегодовая температура атмосферного воздуха составила 7,1°C. За год выпало 561,9 мм атмосферных осадков, что несколько больше среднемноголетней нормы. Самые высокие уровни ГВ в 2023 г. были отмечены в марте. Наиболее высокие за период наблюдения среднегодовые абсолютные отметки уровня ГВ отмечены в скв. 6 (среднегодовое значение – 122,46 м). Самый низкий среднегодовой абсолютный уровень залегания ГВ зафиксирован в скв. 2 (120,35 м). В целом 2023 г., в особенности последние 4 месяца (в сумме выпало 241,4 мм или 43,0% от годового количества атмосферных осадков), был благоприятным для увеличения баланса ГВ. Уровень ГВ в конце года по сравнению с началом года увеличился на 30 см.

Атмосферные осадки – главный фактор, способствующий увеличению запасов ГВ в пойменном ландшафте. График годовой изменчивости уровня ГВ в 2023 г. приводится на рис. 1. Динамика колебаний уровня ГВ и уровня воды в реке Инсар совпадают по времени.

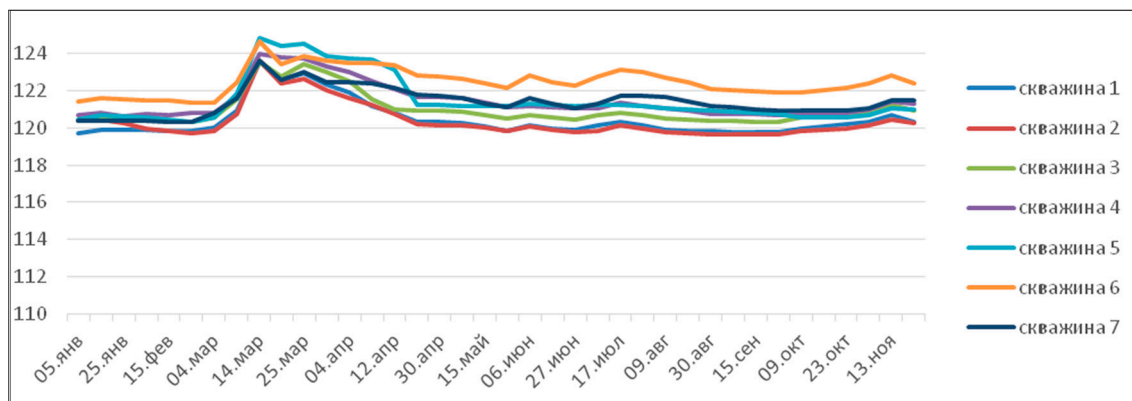


Рис. 1. Абсолютный уровень ГВ в наблюдательных гидрогеологических скважинах в 2023 г., м над уровнем Балтийского моря

### Значения коэффициента корреляции Пирсона между уровнем грунтовых и поверхностных вод

Скв.	Годы							Среднее значение
	2010	2012	2019	2020	2021	2022	2023	
1	0,91	0,96	–	–	–	–	0,94	0,94
2	0,90	0,97	0,85	0,85	0,85	0,96	0,92	0,90
3	0,87	0,96	0,87	0,87	0,87	0,93	0,90	0,90
4	0,85	0,94	0,87	0,87	0,87	0,83	0,88	0,87
5	0,84	0,93	0,75	0,75	0,75	0,67	0,84	0,79
6	0,74	0,81	0,82	0,82	0,82	0,74	0,75	0,79
7	0,76	0,75	0,53	0,53	0,53	0,70	0,79	0,66
Среднее значение по району	0,84	0,90	0,78	0,78	0,78	0,81	0,86	0,82

Для оценки взаимосвязи ГВ и поверхностных вод р. Инсар был рассчитан коэффициент линейной корреляции Пирсона (таблица). Значения коэффициента корреляции между уровнем ГВ и поверхностных вод р. Инсар изменялись от 0,53 (скв. 7 в 2019–2021 гг.) до 0,97 (скв. 2 в 2012 г.). В целом значения коэффициента корреляции положительные и в скважинах, расположенных в непосредственной близости от русла реки, имеют значения 0,75 и выше, что говорит о существовании тесной прямой связи между уровнем ГВ и поверхностных вод. Для скважин 6 и 7, расположенных на более значительном удалении, значение коэффициента корреляции снижается. Для скважины 7 с 2019 по 2021 г. значение коэффициента корреляции составило 0,53, что говорит об ослаблении взаимосвязи ГВ и поверхностных вод. Для скважины 6 значение коэффициента корреляции изменяется от 0,74 до 0,82.

Распределение коэффициента корреляции изменяется по годам. Выявлено, что наиболее высокие значения коэффициента корреляции отмечены в годы со значительным количеством выпавших атмосферных осадков. Так, 2012 г., характеризующийся как многоводный, имеет средний коэффициент корреляции по району исследования, равный 0,90. 2023 г., также богатый на атмосферные осадки, имеет средний коэффициент корреляции по району исследования, равный 0,86. В мало- и средневодные годы значение среднего коэффициента корреляции по району исследования варьирует от 0,78 до 0,84.

Наиболее высокие средние значения коэффициента корреляции за рассматриваемый период отмечены для скважины 1, ближе всего расположенные к гидрологическому посту на р. Инсар. С удалением от гидрологического поста значения коэффициентов корреляции сокращаются.

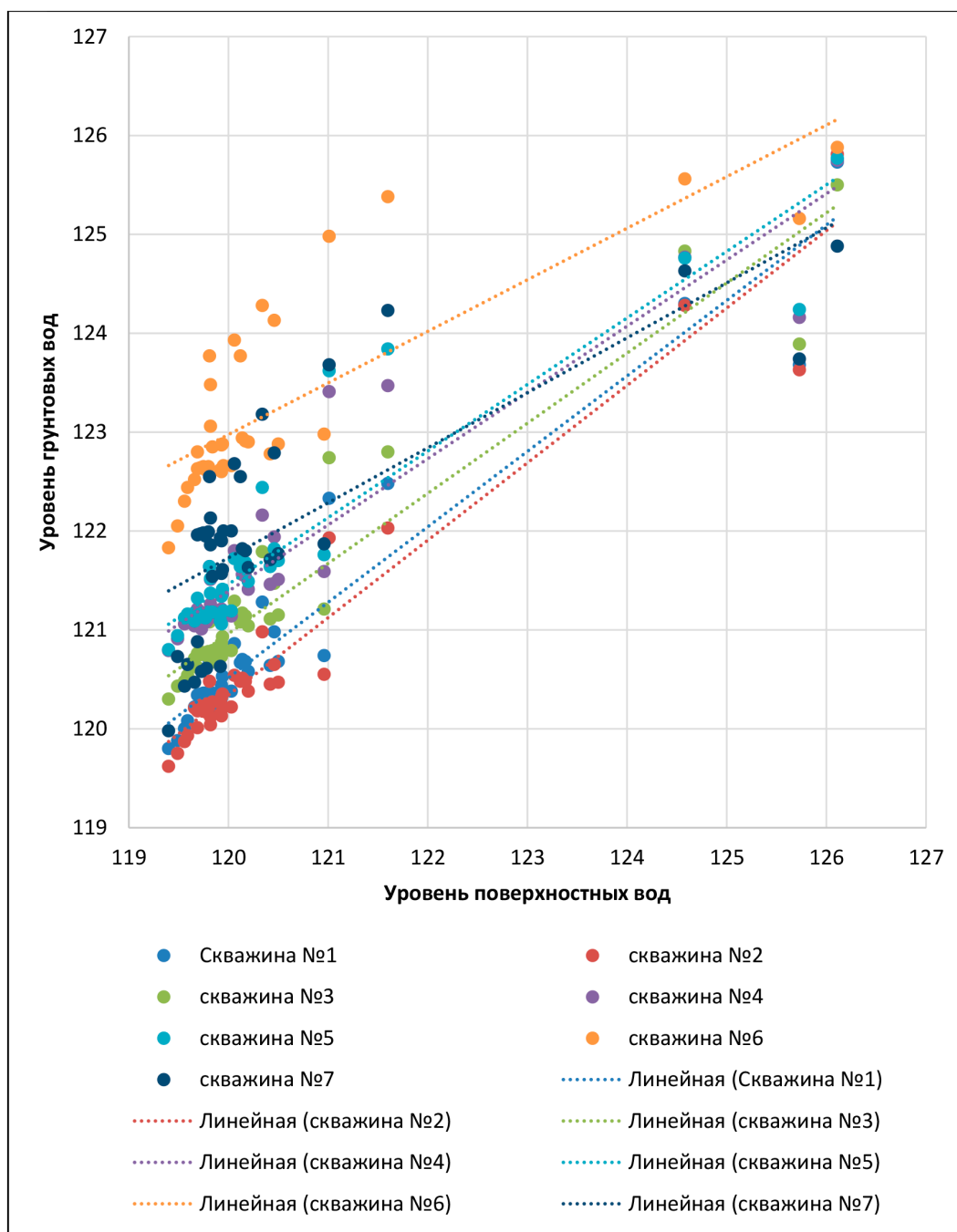


Рис. 2. График линии тренда между поверхностными и ГВ за 2012 г.

Так, для скважины 5, расположенной близко к р. Инсар, но на значительном удалении от гидрологического поста, средний коэффициент корреляции снижается до 0,79. Для скважин, расположенных на удалении от реки, теснота связи ослабевает, и средние значения коэффициента корреляции изменяются от 0,66 (скважина 7) до 0,79 (скважина 6). При этом первая из них скважина удалена на более значительное расстояние

от гидрологического поста. В этом случае связь между ГВ и поверхностными водами становится непостоянной.

Построенный график линии тренда показывает линейный характер зависимости поверхностных и ГВ (рис. 2). Тип графика «восходящий». Наиболее высокая зависимость отмечена для гидрогеологических скважин, расположенных вдоль русла р. Инсар. Самые низкие значения зависимости

у гидрогеологических скважин, удаленных от русла и реки и расположенных по границе поймы и речной террасы (по линии тылового шва).

### Заклучение

Для оценки взаимосвязи поверхностных вод р. Инсар и ГВ современного аллювиального водоносного горизонта использовались результаты парного корреляционного анализа. Анализ коэффициентов корреляции Пирсона показал, что наиболее высокая теснота связи между поверхностными и ГВ характерна для многоводного года, со значительным выпадением атмосферных осадков. Значения коэффициента корреляции положительные для всех скважин. Для скважин, расположенных в непосредственной близости от русла реки (не более 50 м), коэффициенты корреляции имеют значения 0,79 и выше, что говорит о существовании тесной прямой связи между уровнем ГВ и поверхностных вод. Наиболее высокие значения коэффициента корреляции отмечены для гидрогеологической скважины 1, расположенной в непосредственной близости к руслу реки

и ближе других скважин расположенной к гидрологическому посту на р. Инсар.

### Список литературы

1. Серебряков О.И., Серебряков А.О., Ушивцева Л.Ф. Гидрогеология: учебник. М.: ИНФРА-М, 2019. 233 с.
2. Шевченко А.В., Власов М.В. Математическая модель взаимосвязи поверхностных и грунтовых вод // Экология и водное хозяйство. 2019. № 2 (02). С. 117–129.
3. Гриневский С.О. Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод: монография. М.: ИНФРА-М, 2023. 153 с.
4. Кононченко Е.В., Петраш А.Б., Гриневский С.О. Методическая верификация данных мониторинга уровней грунтовых вод // Вестник Московского университета. Серия: Геология. 2023. № 3. С. 77–87.
5. Гальперин А.М., Зайцев В.С., Мосейкин В.М., Пуневский С.А. Гидрогеология и инженерная геология. М.: ИД НИТУ «МИСиС», 2019. 424 с.
6. Коленченко К.Э. Гидрогеология и основы геологии: учебное пособие. Краснодар: КубГАУ, 2019. 107 с.
7. Масляев В.Н., Масляев М.В., Седов П.С. Оценка природной опасности накопления загрязняющих веществ в ландшафтно-геохимических системах Мордовии // Природные опасности: связь науки и практики. Саранск, 2015. С. 266–271.
8. Масляев В.Н., Маскайкин В.Н., Ласкорунский Д.С., Виляйкина К.Н. Особенности динамики уровня грунтовых вод в пойменных ландшафтах среднего течения р. Инсар // Научное обозрение. 2020. № 2. URL: <https://srjournal.ru/wp-content/uploads/2020/04/ID228.pdf> (дата обращения: 15.04.2024).