

УДК 624.131 (476)

А.Н. Галкин*канд. геол.-минерал. наук, доц. каф. географии**Витебского государственного университета имени П.М. Машерова***ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИНЦИПА ЛЕ-ШАТЕЛЬЕ – БРАУНА
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ,
ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ
ЛИТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

В статье на основе данных мониторинговых исследований литотехнических систем локального и регионального уровней обоснована возможность применения принципа Ле-Шателье – Брауна для изучения инженерно-геологических процессов, происходящих в области взаимодействия технической и геологической составляющих этих систем.

Изучение процессов, происходящих в верхних горизонтах литосферы в связи с инженерной деятельностью человека, традиционно считается одной из главных научных задач инженерной геологии. При этом предметами исследований все чаще выступают *литотехнические системы (ЛТС)*, под которыми понимают *любые комбинации из технических устройств или технических продуктов их использования и литосферного блока любой размерности, элементы которых взаимодействуют друг с другом и объединяются единством выполняемой социально-экономической функции*. В инженерной геологии они изучаются с целью обеспечения устойчивого функционирования инженерных сооружений либо инженерно-хозяйственной деятельности человека в целом [1].

По уровню организации выделяют *элементарные, локальные, региональные и глобальные ЛТС* [2]. *Элементарная ЛТС* состоит из отдельного технического объекта (сооружения) и взаимодействующей с ним области литосферы, называемой сферой взаимодействия или областью влияния. *Локальная ЛТС* представляет собой пространственно-временную совокупность элементарных ЛТС, сферы взаимодействия которых граничат или пересекаются. *Региональная и глобальная ЛТС* представляют собой пространственно-временные совокупности подсистем соответствующего более низкого иерархического уровня, выделяемые в пределах конкретного региона или планеты в целом (глобальный уровень).

В силу искусственного происхождения ЛТС принадлежат к подмножеству управляемых и регулируемых систем. Вследствие этого они приобретают свойство организованности, из которого в свою очередь вытекают другие свойства ЛТС, в частности, сохранение или восстановление своей структуры и функций при воздействии внешних факторов – устойчивость. Устойчивость характеризует способность ЛТС при техногенном воздействии определенного типа и интенсивности сохранять неизменными состав, структуру и состояние или изменять их в пределах, не нарушающих функционирования ЛТС. Основными критериями оценки устойчивости являются параметры и показатели состава, структуры и состояния геологической и технической подсистем ЛТС, изменение которых под влиянием техногенных воздействий приводит к возникновению или активизации различных инженерно-геологических процессов. Нередко эти изменения (или развитие инженерно-геологических процессов) сопровождаются причинением геологической среде некоторого ущерба [3]. Это связано с тем, что компенсационные механизмы в геологической среде уже не способны удержать ее в прежнем состоянии, и она утрачивает свойство стабильности из-за перестройки своей структуры и изменений параметров. Выбор направления этих изменений осуществляется, главным образом, для сохранения устойчивого состояния геологической среды, причем из ограниченного чи-

сла альтернатив. Чаще всего необходимость выбора альтернативного состояния возникает при выходе геологической среды на так называемый «режим с обострением», который может завершаться критическими и катастрофическими ситуациями [4].

Один из наиболее общих механизмов сохранения системой устойчивости связан с так называемым принципом Ле-Шателье – Брауна, в соответствии с которым система препятствует любому изменению своего состояния, вызванному как внешним воздействием, так и внутренними процессами, или, другими словами, любое изменение состояния системы, вызванное как внешними, так и внутренними причинами, порождает в системе процессы, направленные на то, чтобы уменьшить это изменение [5].

Установленный в области термодинамического равновесия в различных науках этот принцип трактуется по-разному. Так, например, в статистической физике принцип рассматривается для термодинамически замкнутой системы, находящейся в равновесии, в которой соблюдается правило максимума энтропии [6]. Выполнение принципа Ле-Шателье – Брауна в данном случае является следствием указанных условий.

ЛТС или любая ее подсистема с точки зрения термодинамики не является замкнутой системой. Поэтому говорить о необходимости выполнения принципа Ле-Шателье – Брауна в указанном выше смысле здесь не приходится. Однако для ЛТС его применение может быть полезным не в качестве правила, а в качестве свойства, выполнение или невыполнение которого характеризует способность системы ослаблять оказываемое на нее воздействие при условии, что его интенсивность не превосходит некоторой критической величины. Особенно эффективно применение принципа Ле-Шателье – Брауна для исследования ЛТС, которые функционируют длительное время (десяtkи и сотни лет).

В подтверждение всего вышесказанного приведем результаты многолетних мониторинговых исследований литотехнических систем локального и регионального уровня: ЛТС «Гомельский химический завод» и ЛТС «Водозаборы подземных вод Гомеля», которые иллюстрируют и доказывают применение принципа Ле-Шателье – Брауна для изучения и оценки инженерно-геологических процессов, происходящих в области взаимодействия технической и геологической составляющих этих ЛТС.

Локальная литотехническая система «Гомельский химзавод» функционирует с 1966 г., специализируется на выпуске фосфорных удобрений. Негативным следствием ее работы явилось образование больших отвалов фосфогипса. Их складирование производится на открытый грунт без всяких защитных мероприятий. В настоящее время отвалы занимают площадь более 64 га, их высота превышает 100 м, а масса достигла 20 млн т. В их солевом составе 97,0–97,2% составляет гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), а 2,8–3,0% приходится на фосфаты железа и алюминия, ортофосфорную кислоту, фторсиликаты калия и натрия, фториды кальция [7].

Складирование отходов производства, размещение производственных зданий и сооружений вызвали существенные изменения геологической среды, выразившиеся в сульфатном, фосфатном и фторидном загрязнении грунтов и подземных вод, подъеме уровня грунтовых вод и, как следствие этого, в подтоплении и заболачивании исследуемой территории и прилегающих к ней земель [8].

Изучение масштабов загрязнения геологической среды территории химзавода началось в 1981 г., когда Белорусским научно-исследовательским геолого-разведочным институтом был оборудован створ из 5 наблюдательных скважин на грунтовый водоносный горизонт. В 1984 г. Белорусской гидрогеологической экспедицией были пробурены еще 3 скважины на грунтовый и 1 на палеогеновый водоносные горизонты [9]. Целенаправленные работы по созданию мониторинга геологической среды в районе химзавода стали проводиться с 1986 г. научным коллективом Гомельского госуниверситета имени Ф. Скорины при непосредственном участии автора, когда была организо-

вана специальная режимная сеть, состоящая в настоящее время из 70 скважин, оборудованных на грунтовый (36 скважин) и межпластовые среднеплейстоценовый (22 скважины) и палеогеновый (13 скважин) водоносные горизонты [8].

Многолетние режимные наблюдения за химическим составом подземных вод на территории химзавода позволили проследить динамику их загрязнения. Анализ карт загрязнения грунтового водоносного горизонта сульфатами, являющимися наиболее консервативным из элементов-загрязнителей в районе химзавода, за последние 30 лет свидетельствует о сокращении ореола загрязнения грунтовых вод и снижении концентрации сульфат-иона в них (рисунок 1), несмотря на то, что масса отвалов ежегодно увеличивается на 300 тыс. т фосфогипса.

Причиной этих изменений, как показали исследования, послужили процессы засоления грунтов и заболачивание и связанные с ними явления, проявившиеся в формировании литогеохимических и гидрогеохимических барьеров в компонентах геологической среды. Среди таких явлений следует отметить впервые доказанное экспериментальным путем для рассматриваемой ЛТС появление в грунтовых водах сероводорода в значительных концентрациях ($C(H_2S\uparrow)$ до 48,4 мг/дм³) и образование в грунтах под отвалами новых минеральных соединений (преимущественно гипса) [10; 11]. Последнее подтвердилось в ходе проведения полевых изысканий: под отвалами на глубине 0,5 м был выявлен слой супесчаного грунта повышенной прочности и весьма низкой водопроницаемости мощностью 0,3 м, сформированный, как показали результаты исследований, за счет новообразований на геохимическом барьере на участках контрастного изменения кислотности вод [11].

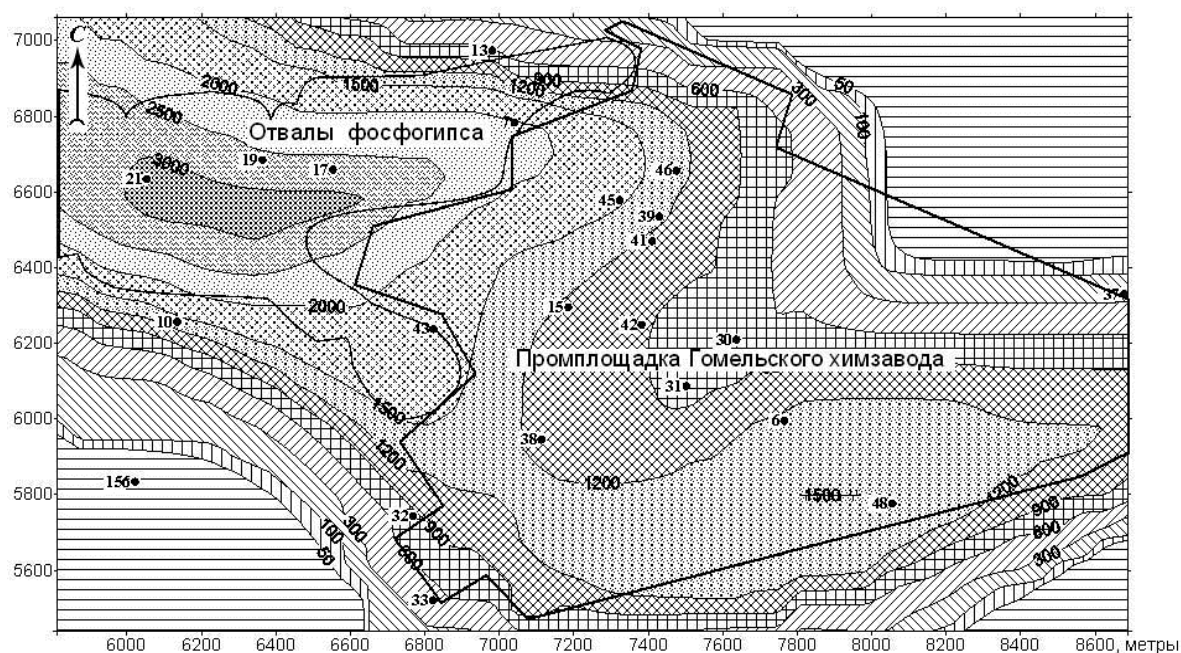
Данный пример иллюстрирует ситуацию, когда в геологической подсистеме ЛТС, находящейся вблизи «режима с обострением», возникают новые инженерно-геологические процессы и явления, способные снизить оказываемое на нее воздействие (повышение концентрации сульфатов в подземных водах) со стороны складированных отходов химического производства, т.е. проявляется принцип Ле-Шателье – Брауна.

Другой пример – *региональная литотехническая система «Водозаборы подземных вод Гомеля»*. Это довольно сложная литотехническая система, занимающая площадь более 350 км² (в границах депрессионной воронки) и включающая в себя 5 групповых водозаборов со сроком эксплуатации от 25–30 до 50–70 лет и более, несколько десятков ведомственных одиночных скважин [8], в совокупности составляющих техническую подсистему, и комплекс мезо-кайнозойских отложений, формирующих зону активного водообмена (до глубины 150–180 м) и составляющих геологическую подсистему данной ЛТС (рисунок 2).

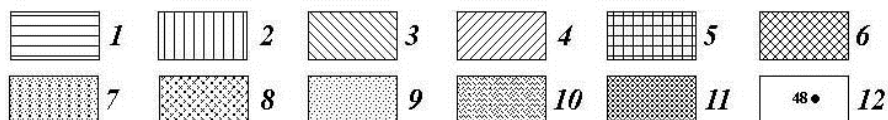
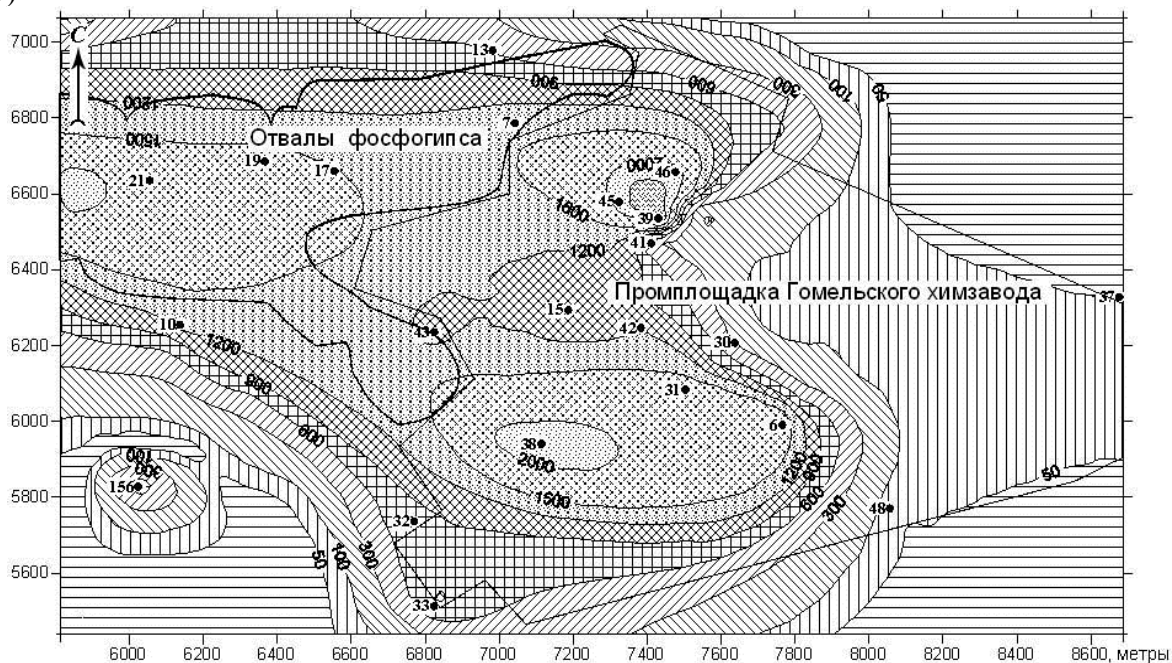
Из опыта изучения подобных систем известно, что их функционирование часто приводит к проявлению ряда негативных процессов и явлений, выражающихся в снижении уровней подземных вод, образовании глубоких воронок депрессии и, как следствие, оседании земной поверхности, истощении ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод, изменении направленности взаимосвязи подземных и поверхностных вод, оказывающем большое влияние на качество подземных вод при эксплуатации [12].

В то же время многолетние мониторинговые исследования на водозаборах Гомеля по 99 наблюдательным скважинам, оборудованным на грунтовый (в различных генетических типах четвертичных отложений), среднеплейстоценовый, палеогеновый, среднесеноманский-маастрихтский, аптский-нижнесеноманский, оксфордский-валанжинский (верхнеюрский) водоносные горизонты и комплексы [7], позволили нам установить ранее не изученное для рассматриваемой ЛТС явление, суть которого выражается в следующем.

а)

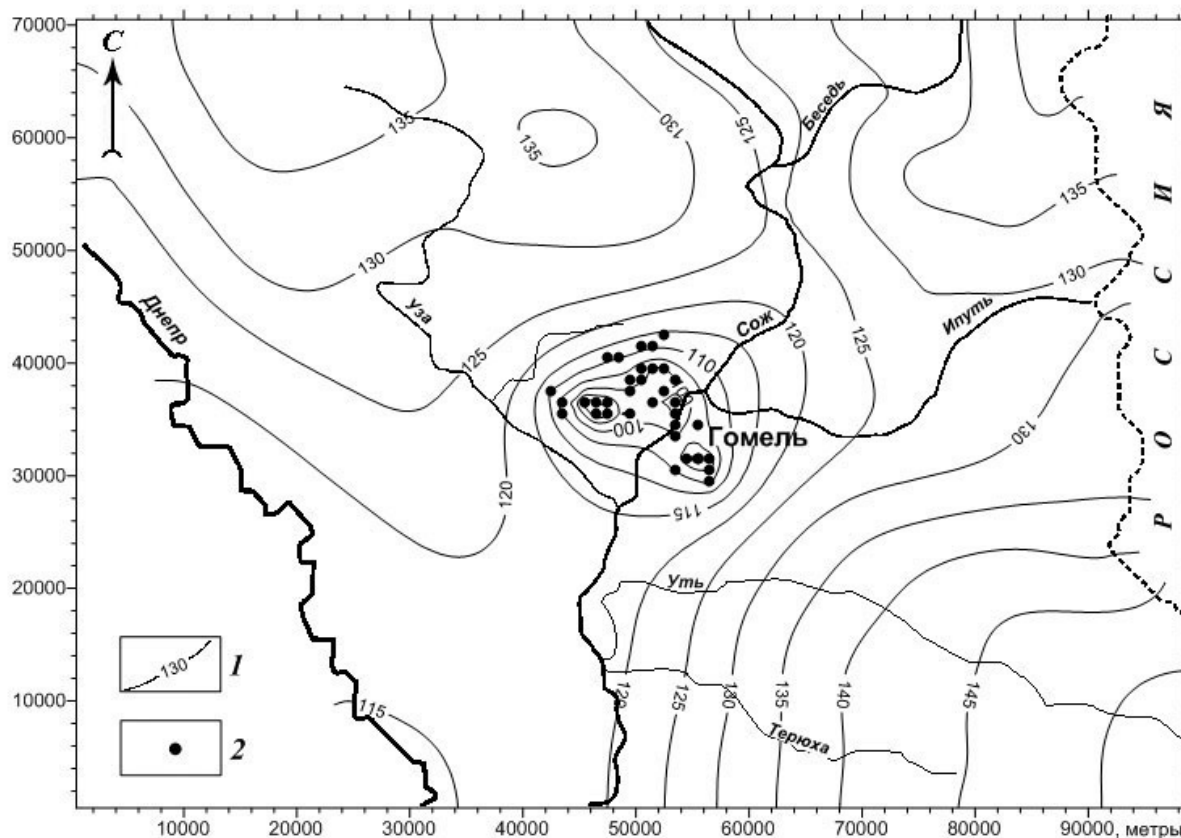


б)



Концентрация сульфат-иона, мг/дм³: 1 – <50; 2 – 50–100; 3 – 100–300; 4 – 300–500; 5 – 500–1 000;
 6 – 1 000–1 500; 7 – 1 500–2 000; 8 – 2 000–2 500; 9 – 2 500–3 000; 10 – 3 000–4 000;
 11 – >4 000. 12 – наблюдательная скважина и ее номер

Рисунок 1. – Содержание сульфат-иона в грунтовых водах на территории Гомельского химического завода по состоянию на а) 1995 г. и б) 2005 г. [8]



1 – гидроизопьезы; 2 – водозаборные скважины или группы скважин

Рисунок 2. – Карта гидроизопьез верхнеюрско-нижнесеноманского водоносного комплекса в условиях работы водозаборов Гомеля (водоотбор 2000 г.) [8]

В работе [13] была выполнена оценка влияния водозаборов Гомеля на уровеньный режим, речной сток и структуру баланса подземных вод. Исследования выполнялись с помощью автоматизированной информационной системы постоянно действующих моделей геологической среды юго-востока Беларуси [14] в стационарной постановке при среднегодовой производительности водозаборов в 1991 г. и неизменной во времени величине инфильтрационного питания. В задачи исследований ставились следующие вопросы: 1) как влияют водозаборы на уровеньный режим подземных вод, 2) происходит ли питание подземных вод непосредственно из поверхностных водисточников и 3) какова доля последних в балансовой структуре эксплуатационных запасов подземных вод?

Результаты решения задач в изложенной постановке приведены в таблицах 1 и 2. Сравнение структуры баланса подземных и поверхностных вод Гомельского региона в естественных (таблица 1) и нарушенных эксплуатацией (таблица 2) условиях показывает, что при работе водозаборов подземный сток в реки сокращается с 507 168 до 428 842 м³/сут, т.е. на 78 326 м³/сут (84% от суммарного водоотбора). Фильтрация воды из рек в грунтовый водоносный горизонт составляет 15 005,3 м³/сут (16% от суммарного водоотбора). Расчетные понижения уровней подземных вод в грунтовом водоносном горизонте на участках водозаборов достигают 2,5–6,0 м [13].

Однако режимные наблюдения позволили установить, что снижение уровней грунтовых вод в зоне влияния водозаборов Гомеля не превышает 1 м. Более того, по результатам наблюдений на отдельных участках уровни грунтовых вод не только не снижались, но даже отмечался их подъем [13].

Таблица 1. – Структура баланса подземных и поверхностных вод зоны влияния водозаборов Гомеля в естественных условиях (стационарный режим фильтрации, м³/сут) [13]

Водоносный горизонт	Реки	Расход подземных вод через	
		подошву горизонта	кровлю горизонта
Грунтовый	0,0	+554 447,0	+874 416,0
	–507 168,0	–554 446,0	–367 247,0
Среднеплейстоценовый	0,0	+337 120,0	+554 446,0
	0,0	–337 120,0	–554 447,0
Палеогеновый	0,0	+220 379,0	+337 120,0
	0,0	–220 379,0	–337 120,0
Среднесеноманский-маастрихтский	0,0	+67 175,0	+220 379,0
	0,0	–67 175,0	–220 379,0
Аптский-нижнесеноманский	0,0	+36 522,0	+67 175,0
	0,0	–36 522,0	–67 175,0
Оксфордский-валанжинский	0,0	0,0	+36 522,0
	0,0	0,0	–36 522,0

Примечание: «+» указывает на приток в водоносный горизонт; «–» – на отток из водоносного горизонта.

Таблица 2. – Структура баланса подземных и поверхностных вод при среднегодовой производительности водозаборов Гомеля, м³/сут [13]

Водоносный горизонт	Реки	Водозаборы Q=const	Расход подземных вод через	
			подошву горизонта	кровлю горизонта
Грунтовый	+15 005,3	0,0	+496 031,0	+874 416,0
	–42 8842,0	0,0	–589 362,0	–367 247,0
Среднеплейстоценовый	0,0	0,0	+283 953,0	+589 362,0
	0,0	0,0	–377 284,0	–496 031,0
Палеогеновый	0,0	0,0	+180 422,0	+377 284,0
	0,0	–11 600,0	–262 153,0	–283 953,0
Среднесеноманский-маастрихтский	0,0	0,0	+51 671,3	+262 153,0
	0,0	–40 231,0	–93 171,3	–180 422,0
Аптский-нижнесеноманский	0,0	0,0	+42 522,7	+93 171,3
	0,0	–41 491,0	–42 524,8	–51 671,3
Оксфордский-валанжинский	0,0	0,0	0,0	+42 524,8
	0,0	0,0	0,0	–42 522,7

Очевидно, что в процессе эксплуатации водозаборов происходит существенное увеличение питания подземных вод как за счет сокращения испарения с урвеной поверхности, так и за счет роста интенсивности инфильтрационного питания в процессе формирования воронки депрессии в грунтовом водоносном горизонте и соответствующего роста емкости зоны аэрации.

Изложенные выше факты позволяют полагать, что значительная часть эксплуатационных запасов подземных вод компенсируется за счет усиления результирующей величины инфильтрационного питания при снижении депрессионной поверхности грунтовых вод. Для количественной оценки данного фактора было выполнено моделирование работы гомельских водозаборов при их фактической производительности в 1991 г. с учетом зависимости результирующей величины инфильтрационного питания от глубины залегания депрессионной поверхности грунтовых вод [13].

После подбора вида зависимости результирующей величины интенсивности инфильтрационного питания от глубины залегания грунтовых вод (в качестве критерия согласования использованы модельные и фактические напоры грунтовых вод) было установлено, что суммарный водоотбор при функционировании ЛТС «Водозаборы подземных вод Гомеля» обеспечивается за счет дополнительного инфильтрационного питания (54%) от суммарного дебита водозаборов, сокращения испарения грунтовых вод через зону аэрации (21%), сокращения подземного стока в реки (24%), притока из поверхностных водоисточников (до 1%) (таблица 3).

Таблица 3. – Структура баланса подземных и поверхностных вод при среднегодовой производительности водозаборов Гомеля ($\text{м}^3/\text{сут}$) с учетом зависимости инфильтрационного питания от глубины залегания грунтовых вод [13]

Водоносный горизонт	Реки	Водозаборы $Q=\text{const}$	Расход подземных вод через	
			подошву горизонта	кровлю горизонта
Грунтовый	+700,4	0,0	+419 244,0	+774 299,0
	-469 704,0	0,0	-515 366,0	-209 174,0
Среднеплейстоценовый	0,0	0,0	+248 754,0	+515 366,0
	0,0	0,0	-344 875,0	-419 244,0
Палеогеновый	0,0	0,0	+148205,0	+344 875,0
	0,0	-11 600,0	-232 735,0	-248 754,0
Среднесеноманский- маастрихтский	0,0	0,0	+7 386,4	+232 735,0
	0,0	-40 231,0	-51 674,3	-148 205,0
Аптский-нижнесеноманский	0,0	0,0	+29 993,0	+51 674,3
	0,0	-44 266,0	-30 002,6	-7 386,4
Оксфордский-валанжинский	0,0	0,0	0,0	+30 002,6
	0,0	0,0	0,0	-29 993,0

Выявленные закономерности формирования условий питания и разгрузки подземных вод в процессе их эксплуатации водозаборными сооружениями представляют собой не что иное, как проявление принципа Ле-Шателье – Брауна. Поэтому применительно к литотехническим системам указанный принцип можно сформулировать следующим образом: *в ЛТС, функционирующей длительное время в режиме, когда геологическая подсистема или ее отдельные компоненты подвержены значительному, но не превышающему технологического уровня воздействию со стороны технического объекта, возникают и активизируются новые инженерно-геологические процессы, ослабляющие результат этого воздействия.*

В заключение отметим, что использование данных мониторинга литотехнических систем различного уровня организации создает реальную доказательную базу применимости принципа Ле-Шателье – Брауна для изучения и оценки инженерно-геологических процессов, которые происходят или могут происходить в области взаимодействия технической и геологической подсистем ЛТС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимов, В. Т. Трансформация экологических функций литосферы в эпоху техногенеза / В. Т. Трофимов [и др.] ; под ред. В. Т. Трофимова. – М. : Ноосфера, 2006. – 720 с.
2. Королев, В. А. Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем : учеб. пособие / В. А. Королев ; под ред. В. Т. Трофимова. – М. : КДУ, 2007. – 416 с.

3. Галкин, А. Н. Особенности возникновения новых природных (геологических) процессов при функционировании литотехнических систем / А. Н. Галкин, И. А. Красовская // Наука – образованию, производству, экономике : материалы XVI (63) регион. науч.-практ. конф. преподавателей, науч. сотрудников и аспирантов, Витебск, 16–17 марта 2011 г. : в 2 т. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: А. П. Солодков (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2011. – Т. 1. – С. 95–97.
4. Режимы с обострением. Эволюция идеи: законы коэволюции сложных структур / Под ред. Г. Г. Малинецкого. – М. : Наука, 1998. – 255 с.
5. Форрестер, Дж. Мировая динамика : пер. с англ. / Дж. Форрестер. – М. : АСТ ; СПб. : Terra Fantastica, 2003. – 379 с.
6. Глаголев, К. В. Физическая термодинамика : учеб. пособие / К. В. Глаголев, А. Н. Морозов. – 2-е изд., испр. – М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2007. – 272 с.
7. Коцур, В. В. Гидрогеохимия зоны интенсивного водообмена территории Гомельского химического завода / В. В. Коцур // Літасфера. – 2000. – № 13. – С. 93–100.
8. Жогло, В. Г. Мониторинг подземных вод на водозаборах и экологически опасных объектах юго-востока Беларуси / В. Г. Жогло, А. Н. Галкин. – Витебск : ВГУ имени П. М. Машерова, 2008. – 161 с.
9. Жогло, В. Г. Опыт ведения мониторинга подземных вод в зоне влияния Гомельского химзавода : обзор / В. Г. Жогло, А. Ф. Акулевич, В. В. Коцур / Бел. науч.-исслед. центр «Экология». – Минск, 1997. – 41 с.
10. Галкин, А. Н. Сероводородное загрязнение подземных вод в районе Гомельского химического завода / А. Н. Галкин, С. Г. Степин, В. Г. Жогло // Инженерные изыскания. – 2009. – № 10. – С. 6–8.
11. Цыганкова, Т. А. Изменение физических свойств покровных отложений территории влияния Гомельского химического завода в процессе техногенеза / Т. А. Цыганкова // Літасфера. – 2009. – № 30. – С. 134–138.
12. Ковалевский, В. С. Исследования режима подземных вод в связи с их эксплуатацией / В. С. Ковалевский. – М. : Недра, 1986. – 198 с.
13. Галкин, А. Н. Об изменении условий питания и разгрузки подземных вод при их эксплуатации (на примере юго-востока Беларуси) / А. Н. Галкин, В. Г. Жогло, А. В. Ковалева // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2010. – № 2. – С. 115–128.
14. Жогло, В. Г. Система численных геофильтрационных моделей верхнего этажа гидrolитосферы юго-востока Республики Беларусь / В. Г. Жогло. – Минск : Ин-т геол. наук НАН Беларуси, 2001. – 176 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 16.04.2015

Galkin A.N. The Possibility of Applying the Principle of Le Chatelier – Braun for Studying Engineering-Geological Processes Occurring During the Operation of Litotechnical Systems

On the basis of the data of monitoring studies litotechnical systems of local and regional basis to justify application of the principle of Le Chatelier – Braun for studying engineering-geological processes occurring in the interaction of technical and geological components of these systems.