

ЭКОЛОГИЯ

М.В. Злобина, А.П. Хаустов

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЭКОЛОГО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ НА ОСНОВЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

M.V. Zlobina, A.P. Khaustov

EVALUATION OF THE SUSTAINABILITY OF THE ECOLOGIC-HYDROLOGICAL SYSTEMS AGAINST THE POLLUTION ON BASE OF HYDROCHEMICAL INFORMATION

Рассмотрены основные методические подходы к нормированию антропогенных воздействий на подземные воды. Предложен набор показателей для оценки устойчивости подземной гидросферы к загрязнению. На основе этих характеристик проведена типизация рек бассейна оз. Байкал по запасу устойчивости.

Ключевые слова: методические подходы, нормирование, антропогенные воздействия, подземные воды, показатели устойчивости, загрязнение.

The basic methodological approaches to the environmental normalization of the anthropogenic influences on the underground hydrosphere are considered. The set of indexes for the estimation of sustainability of underground hydrosphere against the pollution is offered. On the base of this characteristics the classification of the Baikal basin rivers on the sustainability reserve is carried out.

Key words: methodical, approaches, normalization, anthropogenous impacts, groundwater, stability indexes, pollution.

Известно, что использование ресурсов может привести не только к их истощению или деградации их качества, но также к возможным нарушениям в других экосистемах, генетически перекликающихся с данной. Этот принцип взаимодействий наглядно прослеживается на примере подземных вод, тесно связанных с атмосферой, поверхностными водами, зоной аэрации и вмещающими породами.

Очевидна зависимость изменения количественных и качественных характеристик подземных вод от расположения, интенсивности и времени воздействия источника антропогенного загрязнения. С экологических позиций наиболее эффективным мероприятием по их охране является нормирование воздействий на основе экосистемных принципов [Опекунов, 2001]. Цель такого нормирования состоит не только в сохранении оптимальных условий функционирования экосистем, но также в выборе комплексных показателей устойчивости и их численных значений, разработке нормативов и регламентов, ограничивающих не-

гативные воздействия с учетом ассимиляционной способности эколого-гидрологических систем (ЭГС). Устойчивость природных систем к загрязнению проявляется через обменные процессы их самоочищения от чуждых системе веществ, и чем интенсивнее происходит круговорот вещества, тем выше способность речных систем к самоочищению. Данный постулат можно принять за основу при выработке критериев нормирования воздействий по отношению к загрязнению.

Подземная часть речной системы представляет самоорганизующуюся, определенным образом упорядоченную совокупность гидрогеологических элементов, существующую как единое целое за счет взаимодействия, распределения и перераспределения вещества, энергии и информации между твердыми, жидкими, газообразными компонентами и живыми организмами земной коры и смежных геосфер.

Разработка нормативов воздействий должна базироваться на многопараметрическом подходе, т.е. учете возможных вариантов комбинаций параметров эколого-гидрогеологического потенциала (ЭГП). Иными словами, допустимая нагрузка на ЭГС должна определяться совокупностью показателей, характеризующих ее способность к самоорганизации.

Само понятие ЭГП ЭГС и ее устойчивости предполагает разнотипное взаимодействие (энергетическое, информационное, пространственное, временное) элементов и внешней среды, направленных на поддержание одного из устойчивых состояний системы. Это свойство позволяет говорить об эквивалентной системе. Последнее означает, что система способна достигать одного и того же состояния из различных начальных условий (например, восстановление статических и динамических запасов подземных вод, самоочищение и др.). В данном случае по отношению к ЭГС очевидна неприемлемость принципа равенства всех воздействующих факторов.

Введение в расчеты для целей нормирования показателя «модуль химического подземного стока» ($M_{ПХС}$) обусловлено следующими положительными обстоятельствами [Хаустов, 2006]:

- его комплексным характером, затрагивающим подземную ветвь круговорота воды и вещества в массопереносе;
- значения потока веществ с подземными водами отражают состояние наиболее динамичной среды геологического разреза на определенных площадях с учетом пространственно-временных вариаций;
- возможностью получения различнообеспеченных, в том числе экстремальных (5, 50, 95%-ной обеспеченности) характеристик $M_{ПХС}$, что повышает достоверность оценок пределов устойчивости ЭГС, а также таких свойств устойчивости, как интенсивность входа системы в кризис, выхода из него и др.;
- наряду с геохимическим состоянием пород зоны активного водообмена параметры ПХС характеризуют естественные ресурсы или активный отклик на условия увлажнения и последующую инфильтрацию в подземную гидросферу.

Таким образом, при оценке допустимых нагрузок на подземную гидросферу актуализируется роль оценок естественных ресурсов подземных вод, проводимых с начала 60-х годов для различных регионов, поскольку возможна оценка их разбавляющего потенциала и, следовательно, устойчивости, эквививальности и резистентности (необратимости) ЭГС. Эти важнейшие свойства, в свою очередь, являются производными от запаса устойчивости систем, который оценивается по отношению к внешним воздействиям, и имеют точное физическое значение.

Понятие «естественные ресурсы» воедино связывает питание, движение и разгрузку подземных вод, поэтому количественные показатели естественных ресурсов будут наиболее адекватно характеризовать такие свойства ЭГС, как устойчивость или запас прочности в данный промежуток времени.

В отличие от «естественных ресурсов», «подземный сток» отражает не все питание гидрогеологической системы (ГГС) или ее части, а только то, которое остается за вычетом разгрузки в каждом выделенном элементе системы и участвует в латеральной фильтрации подземных вод.

Подземный сток в реки, являясь наиболее активной составляющей собственно подземного стока и естественных ресурсов подземных вод, будет также наиболее адекватно определять устойчивость параметров ЭГС и служить надежным индикатором по отношению к различного вида негативным процессам. Именно эта составляющая естественных ресурсов подземных вод подвержена наибольшим техногенным преобразованиям. Так, отношения значений питания за счет инфильтрации атмосферной влаги ($n \cdot 10^{-2} - n \cdot 10$ л/с·км²) к значениям разгрузки ($0 - n \cdot 10$) косвенно указывают на широкие возможности (почти на два порядка) регулирующей емкости ГГС и, следовательно, ее устойчивости по отношению к изменениям увлажненности в многолетнем разрезе.

В то же время, для рек и озер выдерживаются следующие характерные соотношения расходных и приходных статей баланса: отток (потери) – $n \cdot 10^{-5} - n \cdot 10^{-1}$; разгрузка подземных вод в реки – $n \cdot 10^{-4} - n \cdot 10$ и более л/с·км². Таким образом, в реки разгружается на три порядка больше подземных вод, чем составляют потери. В карстовых и других специфических условиях соотношения между потерями и разгрузкой могут достигать еще больших величин. Однако это не свидетельствует о высокой степени устойчивости данных разновидностей аномальных ЭГС.

Средне многолетние показатели будут характеризовать стационарные условия, экстремальные – размах параметров устойчивости ЭГС. Коэффициент подземного стока будет определять потенциальные возможности разбавления загрязнителей за счет инфильтрации атмосферных осадков. С учетом пространственно-временной неравномерности выпадения атмосферных осадков эти потенциальные возможности будут испытывать вариации в зависимости от условий защищенности подземных вод и количества выпавших осадков. Коэффициент подземного питания рек указывает, какую часть речного стока (%) сформирова-

ли подземные воды наряду с другими источниками питания. Он также подвержен широким вариациям во времени в зависимости от соотношения последних – от 0 при береговом регулировании в период высоких вод до 100 % в периоды межени.

Разгрузка подземных вод осуществляется большей частью в реки и водоемы родниковым стоком, испарением при близком залегании уровней грунтовых вод, а также оттоком в смежные гидрогеологические системы. Кроме этого, для глубоких горизонтов подземных вод питание и разгрузка могут происходить за счет изменения гравитационных и упругих запасов водовмещающих пород в результате геологических процессов, а также элизионных эффектов или гидратации минералов.

Асинхронное изменение питания и разгрузки обусловлено инерционными свойствами ГГС и определяется темпами водообмена гидрогеологических структур. Водообмен в подземной гидросфере – процесс, характеризующий переток вод из одной зоны, структуры, системы в другую. Число циклов водообмена рассчитывается как отношение объема воды, поступившей в пласт, к его емкости за определенный промежуток времени. Это своего рода характеристика динамической составляющей запасов подземных вод, которая также характеризует устойчивость ЭГС или их элементов. Однако в региональном масштабе этот показатель будет функцией гетерогенного строения системы.

Верхний и нижний пределы устойчивости или запас прочности ЭГС могут быть установлены путем расчетов $M_{ПХС\ 5\%}$ и $M_{ПХС\ 95\%}$ обеспеченности:

$$M_{ПХС\ 5\%} = \frac{Q_{\min} C_{\max}}{F}, \quad M_{ПХС\ 95\%} = \frac{Q_{\max} C_{\min}}{F},$$

где $M_{ПХС\ 5\%}$ – величина модуля ПХС 5% (т/год км²), рассчитанная как произведение минимального расхода реки в период летней межени (Q_{\min}) на соответствующую минерализацию воды или содержание нормируемого химического элемента (C_{\max}); $M_{ПХС\ 95\%}$ – произведение величины минимального расхода реки в период зимней межени (Q_{\max}) на величину максимальной минерализации (C_{\min}); F – площадь водосбора, км².

Запас устойчивости (Δ) по отношению к загрязнению подземных вод веществами, попадающими на поверхность речного водосбора (с атмосферными осадками или из других источников), в первом приближении может быть рассчитан как разница различных обеспеченных объемов ПХС:

$$\Delta = M_{ПХС\ 5\%} - M_{ПХС\ 95\%}.$$

По своей сути Δ представляет собой объемы выноса солей при различных условиях дренирования определенных объемов горных пород и с поверхности водосбора. Кроме их проницаемости и естественной защищенности в зоне аэрации величина запаса устойчивости будет зависеть от потенциальной увлажненности территории, где расположен объект. Несмотря на то что атмосферные






осадки сами по себе всегда содержат то или иное количество загрязнителей, их выпадающие объемы будут являться потенциальным растворителем для зоны насыщения.

С целью апробации предлагаемой методики был выбран район, охватывающий бассейны рек Байкальской котловины, как наиболее репрезентативный в целях изучения устойчивости ЭГС. Очевидна неоднородность и контрастность исследуемого региона, где представлены несколько типов ЭГС, отличающихся различной степенью устойчивости к техногенному воздействию.

В результате проведенного анализа показателей устойчивости экосистем 29 бассейнов рек котловины оз. Байкал, по которым существует достаточно надежная информация по стоковым параметрам и гидрохимическим данным, была проведена их типизация (табл. 1).

Таблица 1

Типизация рек по запасу устойчивости ЭГС и характеристики типов для бассейна оз. Байкал

Условные обозначения (см. рис. 1)	Тип устойчивости	Запас устойчивости Δ , т/(год·км ²)	Параметр районирования бассейна оз. Байкал по запасу устойчивости			
			многолетняя изменчивость ПХС, C_v	средняя высота водосбора, м	средне-взвешенный уклон, ‰	общее увлажнение, мм
	Максимальный ($\Delta > 25$)	32,3	5,29	1262	147,8	1315
	Высокий ($15 < \Delta < 25$)	20,2	8,94	1298	16,1	894
	Средний ($10 < \Delta < 15$)	11,5	12,6	921	7,13	872
	Низкий ($5 < \Delta < 10$)	8,45	12,5	1160	3,07	547
	Минимальный ($\Delta < 5$)	2,54	13,6	995	1,37	382

Так, бассейны с наименьшим запасом устойчивости (от 0 до 5 т/(год·км²)) были отнесены к типу с минимальным запасом, от 5 до 10 – охарактеризованы низким запасом устойчивости, от 10 до 15 – средним, далее следуют бассейны с высоким запасом устойчивости и с максимальным, где пределы будут соответствующие от 15 до 25 т/(год·км²) и более.

Вслед за типизацией речных бассейнов по запасу устойчивости было проведено сопоставление полученных результатов с основными стокоформирующими параметрами бассейнов региона, такими как общее увлажнение, внутригодовая изменчивость, средняя высота водосборов и их средневзвешенный уклон. Каждый из параметров в той или иной степени дал отклик на проведенную типизацию, что, на наш взгляд, и подтверждает ее правильность.

Подобного рода верификация дала возможность провести районирование всей территории бассейна оз. Байкал по степени устойчивости к аэрогенному загрязнению (рис. 1).

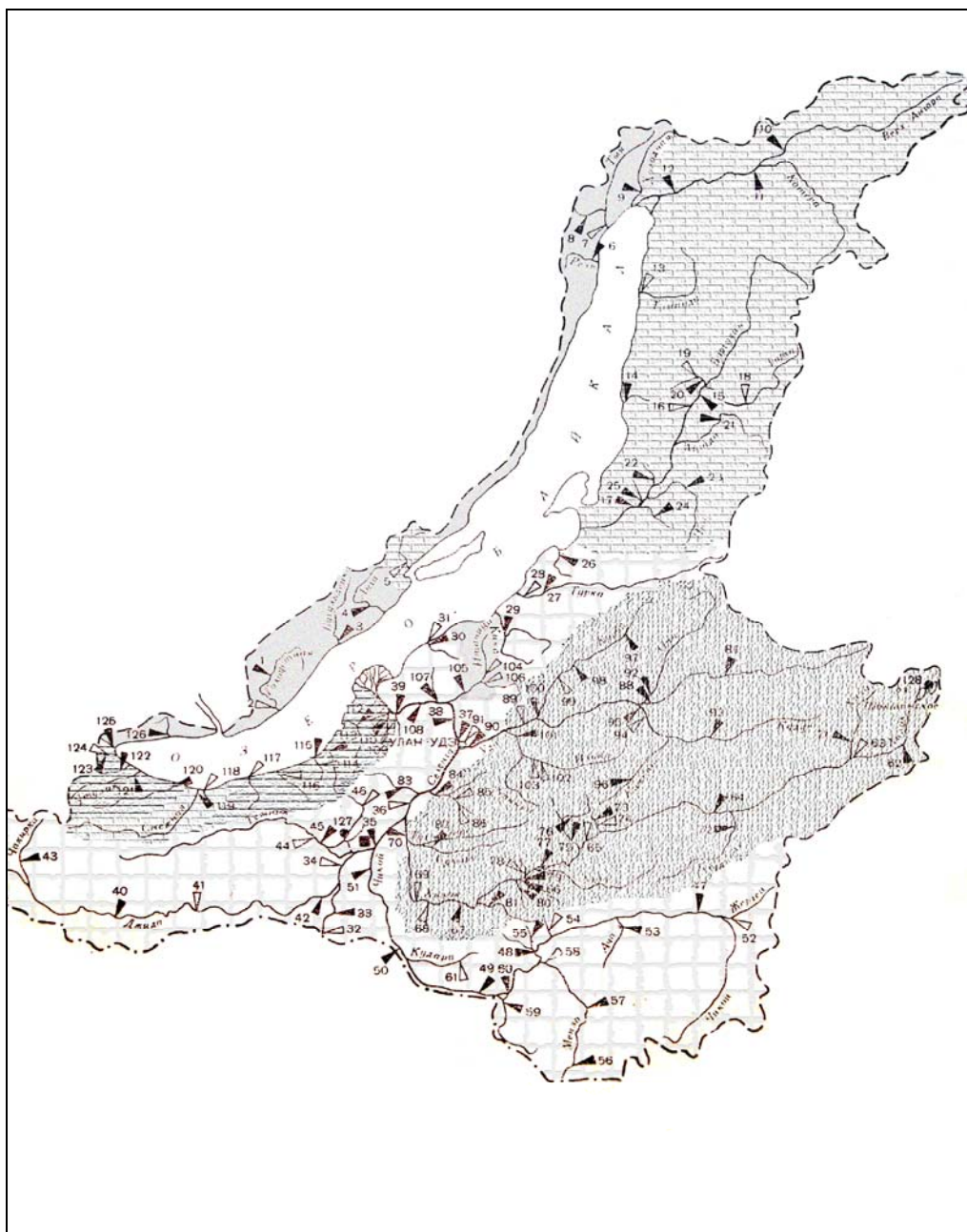


Рис. 1. Карта районирования и характеристика выделенных типов в бассейне оз. Байкал по запасу устойчивости ЭГС.

Первый тип бассейнов рек с *максимальным* запасом устойчивости занимает западные склоны хребта Хамар-Дабан со средними высотами 1200–1500 м

и крутизной склонов до 25° . Анализируемый регион отличается повышенным увлажнением, где осадки составляют 1210–1443 мм/год, а показатель общего увлажнения больше 1300 мм. Многолетняя изменчивость ПХС в данном случае минимальна, что говорит о высокой степени устойчивости этого типа ЭГС. Для района следует отметить высокую взаимосвязь запаса устойчивости и интегральной характеристики высоты местности – средневзвешенного уклона водосборов. Выявленная закономерность подтверждается достаточно высокими коэффициентами корреляции запаса устойчивости с общим увлажнением, многолетней изменчивостью ПХС, средней высотой и средневзвешенным уклоном водосбора (больше 0,50 ‰), что говорит о зависимости величины устойчивости от других показателей (кроме C_v , где связь по силе не меньше 0,50, а характер зависимости обратный).

К типу с *высоким* запасом устойчивости отнесены ЭГС бассейнов рек Баргузинской долины и Верхнеангарской впадины, а также бассейны рек Сарма и Снежная. Особенности рельефа в данном регионе определяются наличием высокогорных хребтов Баргузинского, Икатского и Верхнеангарского со средними высотами 1300–1500 м. Хотя средняя высота водосборов для этого типа и несколько больше предыдущего, осадки в данном регионе также превышают испарение и составляют 800–1000 мм в год. Более низкое количество осадков несколько снижает устойчивость ЭГС. В пользу последнего заключения также свидетельствует более высокое C_v и относительно низкие значения средневзвешенного уклона – 8,94 и 16,1 ‰ соответственно.

Следует обратить внимание на бассейны рек Сарма и Снежная, географически не расположенных в характерном для данного типа регионе. Бассейн р. Снежная, хотя и находится на хребте Хамар-Дабан, но по сравнению с ЭГС первого типа отличается от них самым низким показателем уклона и, как следствие, обладает наименьшим запасом устойчивости (22,7 т/(год·км²)) по сравнению со средним значением первого типа – 32,3). Бассейн р. Сарма также территориально несколько удален от характерного региона и расположен в регионе, для ЭГС которого характерен средний уровень запаса устойчивости. Однако эту реку было бы неправильно отнести к типу со средним запасом устойчивости, так как для данной ЭГС характерно более высокое значение средневзвешенного уклона (8,69 ‰) по сравнению со средним значением третьего типа (7,13 ‰), а также более высокий запас устойчивости.

ЭГС со *средним* запасом устойчивости расположены вдоль западного берега оз. Байкал в пределах Приморского и Байкальского хребтов. Данная местность характеризуется средними высотами от 1000 до 2000 м и крутизной склонов 10 – 20° . Общее увлажнение территории и средневзвешенный уклон существенно ниже, чем для второго типа, и составляют 872 мм и 7,13 ‰ соответственно, тогда как внутригодовая изменчивость, напротив, в данном случае выше, чем у предыдущих типов. Все это говорит о снижении запаса устойчивости, значение которого достигает 11,5.

Отметим, что бассейн р. Итанца, который, хотя и находится территориально в пределах региона с низким запасом устойчивости, нами отнесен к третьему типу, поскольку значение этого показателя для данной ЭГС составляет $13,0 \text{ т/год км}^2$, что значительно выше его средней величины в четвертом типе (8,45).

Как и для предыдущих типов, подтверждается наличие высоких взаимосвязей между общим увлажнением, уклоном и средней высотой. При этом значения запаса устойчивости с многолетней изменчивостью имеют коэффициент корреляции $-0,70$.

К ЭГС с *низким* запасом устойчивости ($\Delta_{\text{ср}} = 8,45$) отнесены бассейны рек Мыкырт, Турка, Вторая Шестипалиха, Джида и Чикой. В целом данный регион характеризуется наличием средневысотных хребтов, средневзвешенный уклон водосборов составляет лишь $3,07 \%$. Общее увлажнение территории не достигает 550 мм в год, а C_v типа практически эквивалентен предыдущей.

Пятый тип ЭГС с *минимальным* запасом устойчивости включает бассейны рек Хилок, Оронгой, Уда, которые расположены в относительно однородном по климатическим показателям регионе со средними высотами до 1000 м . Данный тип характеризуется минимальными показателями средневзвешенного уклона, общего увлажнения и, как следствие, самого запаса устойчивости, что вполне соответствует предложенному принципу районирования изучаемой территории. Многолетняя изменчивость, как и ожидалось, имеет максимальное значение ($13,6$), так как этот параметр является следствием закономерности: *чем меньше запас устойчивости геосистемы, тем большее его пространственно-временная изменчивость*. В выделенном районе при анализе матрицы коэффициентов корреляций интерес представляют два значения, отражающие взаимосвязь запаса устойчивости с C_v ($-0,63$) и средней высотой. Достаточно высокая сила связи со средней высотой ($0,81$) свидетельствует о сильном влиянии данного фактора на запас устойчивости.

Запас устойчивости системы, как было сказано, представляет собой разность верхнего и нижнего пределов устойчивости, т.е. экстремумов системы. Интересно проанализировать взаимосвязь экстремумов этого параметра с характеристиками водосборов (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции пределов устойчивости ГГС с основными стокообразующими параметрами водосборов

	Общее увлажнение	Многолетняя изменчивость ПХС	Средневзвешенный уклон водосбора	Средняя высота водосбора	Лесистость бассейнов
$M_{\text{ПХС}} 95\%$	0,51	$-0,58$	0,61	0,56	0,30
$M_{\text{ПХС}} 5\%$	0,70	$-0,65$	0,66	0,68	0,37
$M_{\text{ПХС}} 50\%$	0,63	$-0,62$	0,64	0,61	0,38

Обращает внимание отклик МПХС 5 %-ной и 95 %-ной обеспеченности на изменения средневзвешенного уклона местности и на ее общее увлажнение, что

говорит о тесной зависимости данных параметров друг от друга. Верхним пределом устойчивости ЭГС является модуль ПХС 5% обеспеченности, характеризующий такое состояние системы, превышение параметров которого повлечет негативные последствия. Нижний предел устойчивости представлен модулем ПХС 95% обеспеченности. Выход за данные лимиты может вызвать нарушение устойчивого состояния системы и невозможность ее возврата к естественному режиму.

С экологических позиций максимальный предел характеризуется интенсивной мобилизацией веществ, в том числе и техногенной природы из толщ дренирования с последующим их транспортом в речную сеть или водоемы. Для многих ингредиентов, несмотря на огромные объемы разбавления, концентрации в водах рек могут превышать ПДК. Именно в этот период происходит максимальное самоочищение не только поверхности водосбора, но и его подземной части.

Превышение этого предела предполагает максимально возможное пополнение водоносных горизонтов с экстремальным поднятием уровней грунтовых вод, а при близком их залегании к поверхности земли – подтопление территорий с соответствующими последствиями. Эти последствия для поверхностного стока проявятся в формировании максимальных расходов паводков, поскольку подземные резервуары имеют максимальное заполнение, развитие многих нежелательных экзогенных геологических процессов (сели, оползни, суффозия, засоление почв и др.). Также могут произойти значительные изменения в структуре растительных сообществ в силу переувлажнения приповерхностной части водосборов.

В то же время достижение системой нижнего предела устойчивости приводит к обратным эффектам, заключающимся в критических размерах осушения водоносных горизонтов и вышележащей части разреза. Это приводит к исчезновению стока и даже для достаточно крупных водосборных площадей, включающих сотни тысяч квадратных километров (р. Шилка, Аргунь, Подкаменная Тунгуска и др.). В период зимней межени происходит промерзание водотоков, гибель ихтиофауны, образование гигантских наледей, меняющих ландшафты, заторные и зажорные явления, приводящие к катастрофическим половодьям, падение производительности водозаборов, подтягивание к водозахватным сооружениям некондиционных по качеству вод и другие нежелательные явления.

В приведенной выше таблице показатели лесистости местности не дали ответной реакции на изменение экстремумов состояния устойчивости, однако известно, что лесная растительность в значительной степени как раз и обуславливает устойчивые гидрологические показатели, а также снижение загрязнения водных объектов и системы в целом техногенными веществами.

Однако если проследить закономерности формирования типов устойчивости, можно увидеть взаимосвязь между запасом устойчивости и лесистостью местности: чем больше процент лесистости территории, тем больше запас устойчивости. Некоторые отклонения наблюдаются лишь в регионе с высоким запасом устойчивости, так как Баргузинская долина в значительной степени подверглась антропогенному освоению (табл. 3).

Распределение запаса устойчивости и лесистости по выделенным типам

Тип бассейнов по запасу устойчивости, т/год км ²	Запас устойчивости, т/(год км ²)	Лесистость, %
Максимальный ($\Delta > 25$)	32,33	86
Высокий ($15 < \Delta < 25$)	20,24	67
Средний ($10 < \Delta < 15$)	11,48	89
Низкий ($5 < \Delta < 10$)	8,45	75
Минимальный ($\Delta < 5$)	2,54	60

Для изучаемого региона запас устойчивости ЭГС обусловлен высотой местности, а следовательно, количеством поступающих осадков. Роль уклона водосборов, как одного из наиболее важных показателей ЭГП ЭГС, состоит в активном перераспределении поступающей влаги на подземную и поверхностную составляющие стока, а также в формировании циклов водообмена подземных резервуаров.

Механизм влияния уклона местности на устойчивость гидросферы по отношению к выпадающим загрязнителям может быть интерпретирован как лимитирующий фактор времени взаимодействия поступающих загрязнителей с подстилающей поверхностью (почвами) зоной аэрации и зоной насыщения. Действие этого фактора происходит в условиях высокого увлажнения, значительно превышающего тепловой потенциал испарения, что не позволяет сформировать солонцовый тип почв с дальнейшим проникновением загрязнителей в зону насыщения. Иными словами, ассимиляционный потенциал гидрологической системы в этих условиях по отношению к рассредоточенному характеру загрязнения является максимальным.

Надежным индикатором устойчивости может явиться структура сообществ лесной растительности. В целом выбор предложенных параметров запаса устойчивости в качестве показателя состояния ЭГС оправдан для данного региона (как и предлагаемые пределы типизации), поскольку разбиение совокупности объектов на типы наглядно продемонстрировало зависимость данного показателя от основных стокообразующих показателей водосборов.

Литература

1. *Опекунов А.Ю.* Экологическое нормирование. – СПб.: изд. ВНИИ «Океангеология», 2001. – 216 с.
2. *Хаустов А.П.* Основы нормирования техногенных воздействий на подземную гидросферу: Учебное пособие. – М.: Изд-во РУДН, 2006. – 100 с.

Статья напечатана в авторской редакции.