

С.П. ГОРШКОВ

**ЭКЗОДИНАМИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
ОСВОЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ**

С. П. ГОРШКОВ

ЭКЗОДИНАМИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
ОСВОЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ



МОСКВА
«НЕДРА»

1982

Горшков С. П. Экзодинамические процессы освоенных территорий. М., Недра, 1982, 286 с.

Показана трансформация геологических процессов в связи с превращением природных ландшафтов в антропогенные на большей части суши, местами сопровождаемым нарушением геологической среды. Рассмотрена модификация этих процессов и систем на равнинах и в горах при различных видах хозяйственного использования земель: рубке леса, избыточной пастьбе, возделывании почв, городском и дорожном строительстве, добыче полезных ископаемых, создании водохранилищ и др. Оценен суммарный эффект деятельности человека. Показана роль измененных природно-антропогенных процессов в загрязнении воздуха и поверхностных вод. Прогнозируются характер и масштабы изменения экзодинамических процессов, обусловленных деятельностью человека.

Для широкого круга специалистов, занимающихся вопросами динамической и инженерной геологии, геоморфологии и т. д.

Табл. 46, ил. 19, список лит.— 50 назв.

Рецензент — д-р геол.-минер. наук В. Т. Трофимов (МГУ)

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

В одном из важнейших документов XXVI съезда КПСС «Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года» в разделе «Охрана природы» записано: «Улучшать охрану природы, усилить работу по сохранности сельскохозяйственных угодий, борьбу с эрозией почв, повысить темпы работ по рекультивации земель, обеспечить их защиту от селей, оползней, обвалов, засоления, заболачивания, подтопления и иссушения». В этой и ряде других лаконичных фраз раздела отражено, какое большое внимание в нашей стране уделяется проблемам рационального использования природы.

Вопросы рационального использования природы требуют, в частности, скорейшей разработки учения о современных геологических и геоморфологических процессах и в особенности о тех из них, которые относятся к разряду экзодинамических. Это объясняется тем, что в настоящее время важнейшей чертой эволюции земной коры и ее рельефа является влияние деятельности человека.

Большое число хозяйственных мероприятий сейчас ведет к значительному изменению рельефа земной поверхности, а часто и к нарушению режима тектонических процессов. Человек управляет многими процессами внешней динамики земной коры, а в отдельных случаях и процессами ее внутренней динамики. Безусловно, прав Е. М. Сергеев, который пишет: «Сбылось научное предвидение В. И. Вернадского и человек стал крупнейшей геологической силой» [31].

Изменение и усложнение геодинамики под воздействием антропогенного фактора делает необходимым пересмотр сложившихся представлений по таксономии геологических процессов. Цель этой книги — показать место главнейших групп процессов внешней динамики земной коры в общей иерархии геологических процессов и рассмотреть данные по природной экзодинамике суши в сравнении с процессами, связанными с деятельностью человека.

Следует подчеркнуть, что учение о природных процессах внешней динамики земной коры само по себе не может считаться до конца разработанным, а создание концепции о природных системах этих процессов вообще не вышло из начальной стадии. Тем не менее было бы неправильным рассматривать связанную с деятельностью человека экзодинамику земной коры только на уровне процессов. Делая это на уровне их комплексов

и систем, можно получить более широкую информацию о свойствах тех же процессов и о характере связей между ними.

На необходимость изучать изменение геологических процессов под воздействием антропогенного фактора еще в 1967 г. обратил внимание А. В. Сидоренко на страницах монографии «Человек, техника, Земля». Он писал, что «нельзя забывать и огромного значения тех геологических процессов, которые протекают непосредственно на поверхности и в приповерхностной части Земли. Проблема изучения этих процессов, особенно учитывая вмешательство в них человека, имеет не меньшее значение, чем проблема освоения космоса, околоземного пространства или глубоких недр Земли» [33]. А. В. Сидоренко считает, что изучение влияния человека на земную кору может оформиться в самостоятельную научную отрасль — техническую геологию, которая «должна синтезировать знания по геологии (во всей широте этой науки), геоморфологии, почвоведению физической географии. . .» [там же].

Необходимыми предпосылками для такого синтеза, по-видимому, должны быть фундаментальные теоретические разработки в указанных науках, имеющие характер широких научных обобщений. Только такого рода концепции в силу их широкого охвата и частичного взаимного перекрытия могут образовать каркас новой научной отрасли. В настоящее время такие обобщения появились и находятся в стадии интенсивной разработки. К ним относятся: 1) учение о геологической среде (Е. М. Сергеев, Г. А. Голодковская, Ф. В. Котлов, Ю. Б. Осипов, В. Т. Трофимов и др.); 2) учение о биогеохимических циклах и их нарушении человеком (В. А. Ковда, А. М. Рябчиков, Б. Болин, Дж. Вудвелл, Е. Дегенс, К. Делвич и др.); 3) учение об измененных (антропогенных) ландшафтах суши (А. Г. Исаченко, Л. И. Куракова, А. М. Рябчиков и др.); 4) концепция о ландшафтно-геохимических системах суши (М. А. Глазовская); 5) концепция о морфосистемах (Ю. Г. Симонов и О. А. Борсук); 6) учение об эрозионно-аккумулятивном цикле (Н. И. Маккавеев, Р. С. Чалов и др.); 7) учение о морфоклиматическом делении суши (Ж. Трикар, А. Кайе, А. П. Дедков и др.).

Для целей данного исследования важно, что эти научные направления органично сочетают в себе: 1) данные о современных процессах внешней динамики земной коры, т. е. перемещении ее вещества с учетом влияния антропогенного фактора; 2) информацию о перемещении вещества в природных и измененных человеком экосистемах; 3) сведения, позволяющие судить не только об отдельных процессах измененной внешней динамики земной коры, но и системах таких процессов.

Человек никогда не ждал милостей от природы, а всегда брал от нее сколько мог. Однако сейчас такому использованию земных ресурсов приходит конец. Настало время, когда познание

геодинамики, в первую очередь экзодинамики земной коры, необходимо для управления и контроля над природными ресурсами, для инженерно-геологического, географического, экологического и других видов прогнозов. Показательно, что Научным Советом по инженерной геологии и гидрогеологии АН СССР среди задач на 11 пятилетку особо выделены две проблемы: 1) разработка основных положений общей теории экзогенных геологических процессов на базе системного анализа и 2) разработка теории и методов регионального и локального краткосрочного и долговременного прогнозов изменения инженерно-геологических условий под влиянием хозяйственной деятельности человека.

Таким образом, всестороннее систематизированное рассмотрение современной экзодинамики земной коры суши является актуальной научной проблемой, имеющей большое практическое значение.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВАЖНЕЙШИХ ТЕРМИНОВ

Процессы внешней динамики земной коры тесно связаны с явлениями в атмосфере, гидросфере, биосфере, а также техносфере. Поэтому дадим определение этих терминов, считая исходными указания тех ученых, которые настаивают на проведении четких границ между геосферами.

Атмосфера — газовое покрывало Земли — состоит из воздуха, представляющего собой смесь газов определенного состава с твердыми и жидкими аэрозолями, парами, каплями воды и частицами льда, а также организмами.

Гидросфера объединяет все поверхностные воды, ледники, льды и снега с находящимися в них веществами и организмами и характеризуется прерывистым распространением.

Земная кора — верхняя каменная геосфера (выше границы М) со всеми заключенными в ней жидкими и газообразными веществами и организмами.

В современном виде названным геосферам присуще также наличие антропогенных объектов. В частности, антропогенные объекты земной коры многие исследователи уже давно включили в ее состав. Один из ведущих советских географов Н. Н. Колосовский еще в 1955 г. подчеркивал, что плотины на рске, каналы, районная электросистема, шахты, сеть железных дорог и т. п. подчинены законам природы. Это та же природа, но в измененной человеком форме. Ф. В. Котлов [18] выделяет, например, в составе антропогенных отложений курганы, но тогда к ним следовало бы отнести и египетские пирамиды. Засыпанные города и поселки, по Ф. В. Котлову, также являются одной из разновидностей антропогенных отложений, включаемых в состав земной коры. Ну, а как быть с незасыпанными или полужасыпанными урбаноконструкциями?

А. И. Спиридонов, классифицируя антропогенный рельеф, пишет, что промышленные и жилые здания можно рассматривать в качестве органических элементов антропогенных геоморфологических ландшафтов. Таким образом, при анализе географических или геологических явлений, связанных с деятельностью человека, возникает необходимость считать созданные им наземные и подземные объекты частью земной коры.

Е. М. Сергеев и его сотрудники выделяют используемую человеком верхнюю часть земной коры в качестве геологической среды. Под геологической средой понимается взаимосвязанная система, включающая горные породы, воду, газы и живые организмы, в пределах которой под воздействием человека изменяются природные геологические или возникают новые инженерно-геологические (антропогенные) процессы и явления.

Геологическая среда входит в состав более обширной области, именуемой техносферой. Эта область, выделенная по иному критерию, нежели геосферы, самая обширная, так как захватывает и часть околоземного космического пространства. *Техносферой можно считать область в пределах земной коры, гидросферы, атмосферы и космоса, в которой находятся, функционируют или применяются принадлежащие человеку конструкции, аппараты, орудия и вещества.* Земную часть техносферы можно именовать геотехносферой.

Человек, создавший техносферу и поддерживающий ее функционирование, сам до возникновения цивилизации полностью зависел от изменений в биосфере — совершенно особой земной оболочке, к которой он принадлежит и сейчас. Биосфера — область существования жизни на Земле. А пространство, где жизнь находится в покоящемся состоянии, например в верхних слоях атмосферы ниже озонового экрана, в сильно охлажденных многолетнемерзлых породах и льдах и т. п., получило название парабiosферы [3].

Термин «биосфера» нельзя считать таксономически равнозначным таким понятиям, как «атмосфера», «гидросфера» и «земная кора». Из данных выше определений было видно, что организмы, обитая там, где для этого имеются соответствующие условия, как бы рассеяны в трех верхних геосферах и занимают часть их объема. Но учитывая огромную преобразующую роль живого вещества по отношению к неживой природе, В. И. Вернадский (1934 г.) все пространство, пронизанное живым веществом, назвал биосферой, указывая, что она представляет собой более сложно построенную и выделенную по другому критерию земную оболочку. К биосфере он относил тропосферу, гидросферу и кору выветривания, а позднее также и стратисферу, метаморфический и гранитный слой (Вернадский, 1954 г.). В. И. Вернадский подчеркивал, что земные оболочки — это таксоны более высокого порядка, чем геосферы.

Для целей данной работы важным является то, что биосфера — это пространство в земной коре, гидросфере и атмосфере, охваченное деятельностью организмов.

Деятельность организмов является важнейшим и наиболее универсальным фактором экзодинамики земной коры. Поэтому можно полагать, что приуроченность процессов ее внешней динамики к биосфере, а также парабiosфере может служить главным критерием для установления границ сферы их действия.

ОБЩЕЕ ДЕЛЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Геологическими именуется процессы, создающие земную кору и изменяющие ее состав и строение. Все геологические процессы протекают в поле силы тяжести Земли, поэтому действие гравитации при их делении на внешние и внутренние можно не учитывать. Однако и при «вынесении за скобки» эффекта действия силы тяжести, порождаемого проявлениями внутривоздушной энергии, оказывается, что не все процессы экзодинамики земной коры могут рассматриваться как целиком экзогенные или внешнеорожденные. Многие из них вызываются совместным действием внешних и внутренних сил. Например, такими являются мутьевые потоки, оползни и обвалы, связанные с землетрясениями, аккумуляция вулканического пепла вместе с терригенным материалом, дезинтеграция пород при совместном воздействии тектонических напряжений или гидротермальной деятельности, с одной стороны, и температурных, морозных, биогеохимических и прочих факторов выветривания, с другой. Даже в условиях стабильных платформенных структур локальные тектонические движения могут существенно менять характер флювиальной деятельности и связанных с ней процессов. Учитывая зависимость многих типично «экзогенных» процессов от внутренних сил Земли, предпочтительнее вслед за В. И. Галицким называть эти процессы экзодинамическими, тем более что понятия «внешняя динамика» или «экзодинамика» земной коры сейчас широко употребляются [9].

Примерно то же необходимо сказать и о термине «эндогенные процессы». Многие процессы внутренней динамики земной коры зависят от изменений нагрузки, вызываемой внешними силами. Например, денудационное срезание гор и происходящее при этом значительное нарушение изостазии земной коры служит причиной их компенсационного поднятия. Под тяжестью ледниковых щитов земная кора под ними прогибается, а при дегляциации — воздымается. Скопление мощных толщ осадков у материкового подножия на дне океана приводит к изостатическому опусканию зон аккумуляции. Даже изменения влажности климата, т. е. флуктуации количества метеорных осадков, сказываются на режиме колебательных флюидогеодинامي-

ческих движений земной поверхности на платформах [26]. Согласно расчетам Г. Н. Назарова, перераспределение воды и образование ледников в высоких широтах и вблизи полюсов во время оледенений и отток воды к низким широтам при дегляциации ощутимо влияют на ротационный режим Земли, ее фигуру и поля напряжений в земной коре и мантии. Таким образом, эндогенные (внутрирожденные) процессы во многих случаях обнаруживают прямую связь и зависимость от внешних сил. Поэтому правы В. И. Галицкий, называющий их эндодинамическими, и Г. П. Горшков и А. Ф. Якушева, употребляющие понятие «эндодинамика земной коры». Следовательно, термин «эндогенные процессы» необходимо заменить понятием «эндодинамические процессы».

Словосочетания «эндодинамический. . .» и «экзодинамический процесс» сами по себе кажутся неудачными, так как нединамических процессов нет. Значит, терминология В. И. Галицкого страдает тавтологией. Однако это, по мнению автора данной книги, является меньшим недостатком, нежели изъяны терминов «экзогенный. . .» и «эндогенный процесс», которые по существу оказываются неверными применительно к целому ряду проявлений геодинамики. Естественно, что в такой ситуации предпочтительнее термины словесно неудачные, нежели неверные по смыслу.

Итак, в целом ряде случаев разделение геологических процессов на экзодинамические и эндодинамические не удастся сделать по обусловленности первых только внешними, а вторых только внутренними силами. Поэтому возникает необходимость в уточнении критериев для их разделения.

Не претендуя на полное решение этого вопроса, выскажем по нему некоторые соображения в порядке обсуждения.

Эндодинамическими следует считать преобразования земной коры под воздействием внутренних сил, а иногда и объединяющихся с ними внешних. Кроме того, к эндодинамическим, по видимому, надо относить и такие изменения в земной коре, которые происходят под воздействием внешних сил, но протекают в термодинамических условиях, превышающих по своим параметрам биосферные.

К экзодинамическим необходимо относить все изменения земной коры в результате внешних, а иногда и объединяющихся с ними внутренних воздействий, протекающих в термодинамических условиях биосферы или парабiosферы.

Любые изменения земной коры совершаются в каком-то определенном пространстве. При этом, когда говорится об экзодинамических процессах, то часто подразумеваются области, охватывающие смежные части земной коры и атмосферы или только более или менее определенные участки (зоны) поверхностной части земной коры. Хотя каждый экзодинамический процесс может со временем проявиться на любом участке по-

верхностной части литосферы, индивидуальность ее экзодинамического преобразования строго определяется сочетанием ряда факторов, главными среди которых являются гидротермический, орографический и сейсмовулканический. Таким образом, любой экзодинамический процесс необходимо воспринимать не только по его специфическому механизму, но и по его индивидуальной пространственной приуроченности. Следует, однако, учитывать, что современное понимание экзодинамических процессов допускает известное наложение сфер действия некоторых из них.

Живые организмы, а также продукты их жизнедеятельности, отмирания и преобразования непосредственно участвуют в экзодинамических процессах на протяжении почти всей геологической истории [10]. Однако ощутимый обособленный эффект деятельности человека в преобразовании земной коры начал проявляться сравнительно недавно и был, по-видимому, связан с использованием огня. Применение огня было известно еще синантропам, существовавшим уже в конце миндельской или в начале миндель-рисской эпохи. Несомненно, деятельность синантропов сопровождалась антропогенными пожарами растительного покрова, а это в отдельных случаях резко меняло природные экзодинамические процессы. Таким образом, как самостоятельная геологическая сила человечество стало впервые проявлять себя 300—400 тыс. лет назад.

В позднем палеолите (35—10 тыс. лет назад) люди уже сооружали долговременные жилища и ямы-кладовые, использовали рытье ям в целях охоты. По сути дела, этот период можно считать началом прямого воздействия человека на земную кору.

В конце позднего палеолита (12 тыс. лет назад) люди создают пещерные жилища в породах Лёссового плато Китая. Это потребовало от них перемещения больших объемов рыхлых отложений.

В раннем голоцене человечество начало возделывать землю и пасти скот, что сопровождалось устойчивым развитием ускоренной денудации на земледельческих площадях и интенсивно эксплуатируемых пастбищах.

Возникновение первых городов, которое произошло 5 тыс. лет назад на Ближнем Востоке, привело к концентрированному воздействию человека на земную кору в их пределах, поскольку на городских территориях человек не только перемещал большие количества грунтов, но и нарушал режим поверхностных и подземных вод, влиял на атмосферные условия.

В дальнейшем экзодинамическое воздействие человека на земную кору усложнялось и быстро росло по масштабам. В XX в. деятельность людей стала влиять также и на режим эндодинамических процессов. Большое развитие получили сейчас вызванные движения земной коры при создании крупных подохранилищ, закачках и откачках из ее недр разнообразных флюидов. Сейсмические процессы и метаморфические преобра-

зования сопровождают каждый взрыв при ядерном испытании, осуществляемом в пределах земной коры.

Таким образом, человечество благодаря своей технической мощи дополняет и меняет обе группы геологических процессов — внешней и внутренней динамики земной коры. Отсюда возникает необходимость такого деления современных геологических процессов, при котором бы учитывалась и их зависимость от антропогенного фактора.

Противопоставляя весьма индивидуальные явления, связанные с падением метеоритов на земную кору, остальным чисто земным природным геологическим явлениям, можно говорить о существовании шести групп геологических процессов. Это группа природных (земных), антропогенных, природно-антропогенных, метеоритных, метеоритно-природных и возможных метеоритно-антропогенных процессов. В книге будут рассмотрены лишь природные, природно-антропогенные и антропогенные экзодинамические процессы.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Природные экзодинамические процессы, как уже указывалось, объединяет их приуроченность к биосфере и ее периферической части — парабiosфере. Живое вещество играет совершенно особую роль в природной экзодинамике вследствие того, что основная масса организмов обладает способностью перехватывать, концентрировать и использовать для своей жизнедеятельности энергию солнечного излучения, а некоторые организмы утилизируют для этой цели химическую энергию минеральных соединений. Взаимодействуя с неживой и, в частности, с неорганической материей, живое вещество меняет состав минералов и горных пород, а также текстуру последних. Оно образует биогенные горные породы, влияет на потоки вещества в атмосфере и земной коре и создает собственные биогенные потоки.

Пределы проникновения организмов в земную кору превосходят глубину распространения таких феноменов экзодинамики, как наличие многолетнемерзлых пород до 1200—1300 м и карстовых пустот примерно до 1100 м. А. В. Лапо указывает, что внутри материковой коры организмы наибольших глубин представлены подземной микрофлорой. Ее развитие ограничивается снизу концентрацией солей в подземных водах (до 300 г/л). Глубина проникновения микрофлоры колеблется от сотен метров до нескольких километров. Однако в современных вулканических областях лимитирующей, по-видимому, является температура подземных вод, уже на глубинах 100—150 м поднимающаяся до 80—100 °С [39]. Правда, имеются сведения, что в условиях высоких давлений, существующих в земной коре, некоторые микроорганизмы могут переносить температуры, несколько превосходящие 100 °С. Тем не менее пределом, при котором еще может протекать, хотя и в ослабленном виде, жизнедеятельность организмов, считается температура не выше 75—80 °С.

Таким образом, распространение организмов в земной коре ограничивается как минерализацией подземных вод, так и температурой. Но поскольку воды с минерализацией 300 г/л и более также обычно нагреты в основном за счет внутреннего тепла Земли, то их, как и гидротермы с температурой выше 80—100 °С, можно рассматривать в качестве одного из агентов эндодинамики земной коры. Следовательно, действие таких нагретых и высокоминерализованных вод блокирует распространение экзодинамических процессов на еще большую глубину земной коры.

При обобщении эффекта экзодинамических процессов часто используются термины «денудация» и «аккумуляция».

Термин «денудация» имеет в литературе двойное толкование. «Все процессы, благодаря которым продукты выветривания горных пород удаляются с мест их образования и перемещаются на более низкие гипсометрические уровни, называют сносом или денудацией»,— пишет И. С. Щукин [45]. Это противопоставление денудации выветриванию, которое рассматривается многими как специфический процесс разрушения и разрыхления горных пород, предшествующий и благоприятствующий их сносу, в некоторых случаях оказывается искусственным и мешает правильному пониманию специфики отдельных процессов. Например, морозное разрушение скальных пород представляет собой раздвигание их обломков. Иногда под действием расклинивающего действия воды тот или иной обломок с треском отлетает в сторону. В итоге такого выветривания, часто сочетающегося с целым комплексом других процессов, грубообломочный скелетный покров смещается под уклон. Говорить, что в указанном случае выветривание только подготавливает коренной субстрат к сносу,— неправильно. Оно само является одним из факторов экзодинамического сноса.

Широкая трактовка термина «денудация» позволяет избежать указанного противоречия. Так, А. Холмс определяет денудацию как «совокупность процессов, приводящих к разрушению (выветриванию) и сносу поверхностных слоев земной коры» [35]. Но следует учитывать, что экзодинамическое разрушение и удаление вещества земной коры происходит и в подземных условиях. Часто вынос вещества из поверхностного слоя сопровождается частичным накоплением его иллювиальным путем несколько ниже. Важно, однако, то, что суммарный результат экзодинамического воздействия, направленный на понижение земной поверхности, связан с убылью массы вещества земной коры в месте воздействия. Поэтому денудация — это экзодинамическое преобразование земной коры, ведущее к уменьшению ее массы в пределах преобразуемого пространства и, как правило, сопровождающееся понижением земной поверхности. Отсюда, аккумуляцией можно считать прибавление массы в любом участке земной коры экзодинамическими процессами. Аккумуляция также может быть поверхностной и подземной.

Денудация земной коры в одном месте не обязательно должна сопровождаться аккумуляцией в другом. Весь выносимый в результате денудации материал может надолго задерживаться в атмосфере. Например, так может случиться при разрушении нефтегазовых залежей. Аккумуляция также может идти достаточно обособленно, например, при включении в состав пород земной коры льдистых образований или при накоплении торфа.

Для суждения о денудации суши или какого-либо ее участка используются данные о речном твердом стоке (сумма взвешенных и влекомых наносов) и стоке растворенных веществ. Модули твердого стока, а чаще только лишь взвешенных наносов, обычно выраженные в т/км²·год, принято считать показателями механической денудации суши. В данном случае под термином «механическая денудация» понимается только снос механически удаляемого обломочного материала. Поэтому это понятие лучше заменить словами «механический снос». Важно учитывать, что реки выносят лишь долю материала, подвергающегося механическому сносу в их бассейнах. Обычно большая его часть задерживается, не достигнув русла на субаэральных элементах рельефа.

Данные по речному ионному стоку или стоку растворенных соединений, выраженные через соответствующий модуль с введенной в него поправкой на содержание в речных водах циклических солей, используются в качестве показателя химической денудации суши. Термин «химическая денудация» в том понимании, как он используется, не охватывает процессов химического (преимущественно биохимического) образования коллоидно-дисперсных минералов. Поэтому его лучше заменить словосочетанием «химический вынос».

По специфике проявления собственно земные экзодинамические процессы можно делить на поверхностные и подземные. Главная особенность первых заключается в том, что они срезают и наращивают земную кору сверху. Зона хорошо выраженного эффекта этих процессов обычно имеет мощность от первых до нескольких десятков метров. Наиболее значительна она в тех местах, где земная кора разрушается в ходе формирования мощных биохимических кор выветривания.

Другой отличительной чертой поверхностных экзодинамических процессов является то, что при их осуществлении вещество земной коры как бы интегрируется с веществом атмосферы и гидросферы. Например, при выветривании воздух, вода, снег, лед сначала пронизывают образующуюся в горной породе систему трещин, пустот и пор. На стадии образования мелкоземы особенно значительными становятся процессы минералогического преобразования, идущие с присоединением воды, кислорода, углекислого газа и других компонентов атмосферы и гидросферы. Одновременно могут удаляться и переходить в состав двух названных геосфер некоторые составляющие минералов и горных пород, например кристаллизационная вода водосодержащих минералов или подземный лед. При переносе продуктов денудации с различного рода потоками часть их временно становится составляющей атмосферы и гидросферы. На стадии аккумуляции и субаэральных и субаквальных условий также идет интенсивный обмен газами, а иногда и растворами в системе осадок \rightleftharpoons атмосфера.

Подземные экзодинамические процессы связаны с поверхностными и представляют собой распространяющееся сверху изменение земной коры, нередко до глубин во многие сотни метров и даже первые километры. В подземные экзодинамические процессы входят карст и другие виды деятельности не нагретых и слабо нагретых подземных вод, ассоциирующиеся с работой микроорганизмов, а также глубокое — на многие десятки и даже сотни метров — проникновение криогенеза.

О влиянии поверхностных процессов на подземные свидетельствуют следующие факты. Так, от гидротермических условий и биологической продуктивности на земной поверхности зависят дебит и агрессивность подземных вод, количество органических и биогенных веществ в них. А. П. Дедков и И. А. Дедкова указывают, что климатический фактор играет решающую роль в изменении интенсивности карстовых процессов в карбонатных породах.

Климатическая зональность проявляется в неодинаковом поступлении в карстующиеся породы поверхностных вод и различным количестве растворенных в них углекислоты и других неорганических и органических кислот.

В целом действие подземных вод приводит к выносу вещества земной коры (главным образом в растворенной форме) с подземным стоком в реки, озера, моря и океаны. Специфические экзодинамические процессы осуществляются в многолетне-мерзлых толщах, наличие которых также связано с особенностями распределения тепла и влаги на земной поверхности.

Огромную роль в подземной экзодинамике играет преобразующая деятельность микроорганизмов, населяющих земную кору. Обычно они располагаются на поверхности минеральных частиц и получают питание из проникающих в породу флюидов. Вследствие жизнедеятельности микроорганизмов выделяются газы и поверхностно-активные вещества, что оказывает существенное воздействие на вмещающие породы [31].

С микроорганизмами связано образование и разрушение месторождений некоторых полезных ископаемых. Микроорганизмы, находящиеся ниже зоны развития поверхностных процессов, вносят ощутимый вклад в газовое «дыхание Земли» и подземный геохимический сток.

Итак, природные экзодинамические процессы можно рассматривать как две связанные группы процессов — поверхностные и подземные. Поверхностные процессы осуществляются в форме непосредственного взаимодействия атмосферы и гидросферы с земной корой. Более богатые кинетической и другими видами энергии текучие воды, ледники, ветер и др. как бы атакуют относительно консервативную земную кору; вещество атмосферы непрерывно интегрируется с коровым, образуя экзодинамические потоки вещества. Подземные процессы, хотя

и являются своеобразным резонансом поверхностных, все же протекают более изолированно. Главный их результат — изменение горных пород в массиве.

ЭНЕРГЕТИКА

Осуществление подавляющего большинства природных экзодинамических процессов в основном обеспечивается за счет поступления солнечной энергии. Согласно М. И. Будыко, на единицу поверхности внешней границы тропосферы Земли в среднем поступает около $1047 \cdot 10^3$ Дж/см²·год коротковолновой солнечной радиации. Из этого количества в плотные слои атмосферы попадает около $699 \cdot 10^3$ Дж/см²·год, поскольку среднее альbedo Земли близко к 0,33. Земная поверхность, до которой в среднем доходит $527 \cdot 10^3$ Дж/см²·год коротковолновой солнечной радиации, также отражает довольно значительную ее часть в виде коротковолнового и длинноволнового излучения. Остающаяся часть (радиационный баланс) в среднем для суши определена в $205 \cdot 10^3$ Дж/см²·год (Европа $163 \cdot 10^3$, Азия $197 \cdot 10^3$, Северная Америка $167 \cdot 10^3$, Южная Америка и Австралия по $293 \cdot 10^3$ Дж/см²·год). Радиационный баланс океанов выше: у Атлантического $343 \cdot 10^3$, у Индийского и Тихого $360 \cdot 10^3$ Дж/см²·год.

Тепло, поглощенное атмосферой и земной поверхностью, используется в различных гидрометеорологических, биологических и геохимических процессах, с которыми в первую очередь и связана экзодинамика земной коры. При этом атмосферные процессы питают как тепло перехваченного солнечного излучения ($247 \cdot 10^3$ Дж/см²·год), так и тепло турбулентной теплоотдачи земной поверхности ($50 \cdot 10^3$ Дж/см²·год) и конденсация водяного пара ($251 \cdot 10^3$ Дж/см²·год). Таким образом, суммарное количество тепла, расходуемого на атмосферные процессы, огромно и составляет $548 \cdot 10^3$ Дж/см²·год. Существенное влияние на атмосферные процессы оказывает также вращение Земли.

Около 90 % тепла радиационного баланса океанов тратится на испарение и часть удаляемой таким путем влаги уносится на сушу и выпадает из нее в виде осадков. Всего за год суша в среднем получает из атмосферы $119\,000$ км³ воды, причем не менее $47\,000$ км³ приносится из океана. Это означает, что тепло, израсходованное на ее испарение и перенос в пределах океана и атмосферы, в конечном итоге идет на осуществление работы, производимой приносимыми осадками на суше. Это же можно сказать и о действии водных океанических масс, осуществляющих геологическую работу на побережье, и ветра, проникающего во все части суши. Таким образом, колоссальная динамичность атмосферы и океана, создаваемая в основном благодаря огромным затратам солнечной энергии, во многом обеспечивает и экзодинамическое преобразование земной коры

суши. Иными словами, *способность атмосферы и океана поглощать и трансформировать большую часть приходящей на Землю солнечной радиации во многом обуславливает повышенную напряженность экзодинамических процессов на суше.*

Вторая важнейшая особенность экзодинамического преобразования земной коры суши связана со спецификой утилизации солнечной энергии растительным покровом. Для обеспечения своей жизнедеятельности фотосинтетики суши должны поглощать очень большую долю приходящей солнечной радиации, исчисляемую десятками процентов от ее общего количества. Согласно Ю. Одуму, в среднем фотосинтетики биосферы поглощают несколько менее 50 % лучистой энергии солнца; максимальное поглощение и среднее в благоприятных условиях достигают 50 %. Растительность поглощает фотосинтетическую активную радиацию, а отчасти ультрафиолетовую и инфракрасную. Ассимиляция первой не превышает, по-видимому, половину общего поглощения или превосходит это количество на очень немного. Остальную энергию для своей жизнедеятельности наземные растения получают за счет частичного использования ультрафиолетовых и инфракрасных лучей, а также поглощения рассеянного длинноволнового излучения и даже за счет таких процессов, как, например, деятельность ветра, которая увеличивает эвапотранспирацию растений.

Энергия, аккумулирующаяся за год в органическом веществе растений, включая и идущую на окисление при дыхании, колеблется от 0,05 до 4,5 % от суммарной приходящей солнечной радиации. Годовое накопление энергии в органическом веществе растений без учета потребленного при дыхании меняется от 0,04 до 1,5 %. В обоих случаях колебания в аккумуляции энергии связаны с изменением гидротермических условий в пределах суши. Самая большая аккумуляция энергии в продуктах фотосинтеза свойственна полноценным лесным сообществам. Ухудшение гидротермических условий, как показано В. Лахером, снижает этот показатель.

Годовая масса чистой первичной продукции наземной растительности оценивается А. М. Рябчиковым [30] в 120 млрд. т, а согласно В. Лархеру она равна 117,5 млрд. т. Это соответствует $2,1 \cdot 10^{21}$ Дж. Средняя чистая продуктивность фотосинтетиков суши равняется $0,078$ г/см²·год, а в энергетическом эквиваленте — 1380 Дж/см²·год.

Основные энергетические затраты растений связаны с эвапотранспирацией. Подсчитано, что для образования 20 т органической массы (что эквивалентно 5 т сухого органического вещества) необходимо затратить 2000 т воды. При этом 15 т воды войдут в состав сырого органического вещества, а 1985 т будут израсходованы на эвапотранспирацию [3]. Ежегодные затраты энергии на эвапотранспирацию растительностью суши составляют $121 \cdot 10^{21}$ Дж, или $78 \cdot 10^3$ Дж/см². Максимальные затраты

солнечного тепла на испарение растениями, свойственные тропическим лесам, составляют $347 \cdot 10^3$ Дж/см²·год.

Растительный покров суши, масса которого для современных условий оценивается А. М. Рябчиковым в 1770 млрд. т, а Дж. Вудвеллом и Р. Хоутоном в 1821 млрд. т в сухом весе, включает в себе около $32 \cdot 10^{21}$ Дж. *Поглощая и преобразуя большие количества солнечной энергии, растительность суши кардинально меняет и происходящие на ней экзодинамические процессы. Она выступает в роли уникального по своим качествам щита-трансформатора, блокирующего прямое физическое воздействие ветра, метеорных осадков и температурных колебаний на поверхностную часть земной коры и в значительной мере преобразующего их энергию в биохимическую работу, совершающуюся в поверхностном почвенно-элювиальном слое, а отчасти и глубже.*

Под пологом хорошо развитой растительности физическое выветривание, для осуществления которого требуются сравнительно небольшие количества энергии, сочетается, а в условиях равномерно влажного и теплого климата вообще подавляется энергоемким биохимическим преобразованием горных пород. Этот процесс и ведет к образованию почвы и глинистой коры выветривания. Почвенно-элювиальный чехол наиболее тесно связан с растительным покровом. Поэтому им перехватывается и фиксируется в наибольшем количестве энергия, рассеиваемая растительностью и существующими за ее счет остальными организмами. Энергия накапливается в органическом веществе подстилки и гумуса в форме поверхностной энергии частиц и в виде химической энергии кристаллических решеток некоторых вторичных минералов.

Массы подстилки и гумуса почвы в современных условиях соответственно равняются 184 и 2036 млрд. т [19], что эквивалентно $3,8 \cdot 10^{21}$ и $42,62 \cdot 10^{21}$ Дж. Если эти величины отнести к единице площади, то запасы подстилки и ее энергетические ресурсы в среднем составят 0,13 г/см² и 2720 Дж/см², а гумуса — 1,52 г/см² и $32 \cdot 10^3$ Дж/см². Следует учитывать, что формирование подстилки почвы осуществляется весьма быстро в сроки, колеблющиеся от нескольких месяцев до десятилетий, тогда как оборачиваемость гумуса — длительный процесс, исчисляемый согласно М. М. Кононовой и И. В. Александровой, в 800—1500 лет. Поэтому по отношению к энергии, поглощаемой наземной растительностью и запасаемой ею, годовая аккумуляция энергии в мертвом органическом веществе почвы не так велика и может быть очень приблизительно оценена в 2930 Дж/см² для подстилки и в 29 Дж/см² для гумуса.

Поверхностная энергия частиц накапливается в почвенно-элювиальном покрове во всех случаях, когда плотные литифицированные породы преобразуются в рыхлые. Затраты энергии на образование мелкозема из массивных пород могут быть

оценены по формуле В. А. Николаева и В. В. Доливо-Добровольского

$$\Delta A = \sigma \cdot \Delta a,$$

где ΔA — затраты энергии в эргах; Δa — прирост поверхности при образовании частиц в см²; σ — переходный коэффициент, равный $1 \cdot 10^{-4}$ — $1,5 \cdot 10^{-4}$ Дж/см².

С помощью этой формулы и данных из ряда других работ автор подсчитал, что поверхностная энергия глин варьирует от 21 до 1068 Дж на 1 г породы, будучи минимальной у каолиновых, средней у гидрослюдистых и максимальной у монтмориллонитовых глин.

Специальный подсчет поверхностной энергии, аккумулированной в литологических разновидностях почв, не производился. Однако вышеприведенные цифры свидетельствуют, что почвы глинистого состава, несомненно, обладают значительными запасами аккумулированной поверхностной энергии, тогда как малоглинистые почвы, особенно песчаные и скелетные, очень бедны ими.

В ряде случаев почвообразование, по-видимому, может даже уменьшать удельную поверхность дисперсных пород и, следовательно, выступать в качестве фактора, снижающего запасы поверхностной энергии частиц в материнском субстрате. Такое явление, несомненно, имеет место при формировании криогенных почв на глинах или глинистых алевритах, в ходе которого достаточно широкое развитие получает криогенная коагуляция глинистых частиц.

О масштабах накопления поверхностной энергии частиц при образовании дисперсных элювиальных пород можно судить на основании данных И. И. Гинзбурга и Ю. Ю. Бугельского о скорости корообразования во влажных тропиках. Скорость образования глинистого элювия в указанных условиях, равную 1 см/100 лет, по-видимому, нельзя считать преувеличенной. Таким образом, при формировании глинистого элювия в виде поверхностной энергии в нем аккумулируется от 42 до 210 Дж/см²·год. Накопление солнечной энергии при выветривании происходит также в решетках некоторых гипергенных минералов. Такие минералы получили название геохимических аккумуляторов. В то же время в целом ряде случаев при выветривании гипогенных минералов происходит выделение тепла. Однако это не мешает рассматривать почвенно-элювиальный чехол суши в качестве специфического слоя, в который через посредство растительности и связанных с ней гетеротрофных организмов постоянно привносится солнечная энергия. Аккумуляция последней в этом слое составляет только десятые доли процента от ее поступления от Солнца и может быть очень приблизительно оценена в 419 Дж/см²·год, т. е. в $544 \cdot 10^{18}$ Дж/год для суши в целом. Это большая величина по сравнению с поступле-

нием энергии из других источников, с которыми также связано энергообеспечение экзодинамических процессов. Участие в экзодинамических процессах внутренних сил Земли обеспечивается тем, что мегарельеф земной коры и образующие его морфоструктуры сформированы при обязательном участии тектонических сил. В частности, для суши, как показывает З. А. Сваричевская, абсолютные высоты гор отражают интенсивность горообразовательных процессов. Таким же образом принято объяснять и разницу в гипсометрии равнинно-платформенных территорий. Следовательно, в основном перемещение на суше продуктов денудации на более низкие гипсометрические уровни представляет собой реализацию потенциальной энергии, приобретенной областями сноса при их тектоническом поднятии. Представление о том, какими запасами гравитационной энергии обладают морфоструктуры современной неледниковой суши, можно составить по сведениям о площадях ее различных высотных ступеней (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что соотношение горной и равнинной площадей неледниковой суши равняется 2 : 7. Однако, как показал Ж. Корбель, снос с гор в целом примерно на порядок больше, чем с равнин. Следовательно, с равнин в природных условиях должно сноситься примерно втрое меньше продуктов денудации, чем с гор. Горы с отметками менее 2000 м занимают большую площадь, чем более высокие. Однако снос сильнее идет именно с последних. То же можно сказать и о равнинной суши, в составе которой уровень с отметками 500—1000 м составляет примерно четвертую часть их площади. Условно примем, что сносимые с равнин продукты денудации в среднем перемещаются вниз на 750 м, а удаляемые с гор — на 2500 м. Исходя из цифр природного денудационного сноса с неледниковой суши порядка 18 млрд. т/год, можно подсчитать, что ежегодные затраты гравитационной энергии на экзодинамические процессы в ее пределах составят около $36 \cdot 10^{16}$ Дж, в том числе в горах 33×10^{16} Дж (1 Дж/см²·год) и на равнинах $3 \cdot 10^{16}$ Дж (0,03 Дж/см²·год).

По запасам гравитационной энергии на единицу площади горные территории значительно превосходят равнинные. Большинству горных территорий свойственно проявление в настоящее время сейсмических, а местами и вулканических процессов, что создает дополнительную напряженность в проявлении экзодинамических процессов в таких горах.

В областях современного и кайнозойского вулканизма, а также в рифтовых зонах теплопоток имеет максимальные значения и достигает 335—502 Дж/см²·год. Значительным для земной коры является и выделение сейсмической энергии в областях наиболее сильной сейсмичности (островные дуги, глубоководные желоба), доходящие до 251 Дж/см²·год. Следовательно, в подвижных поясах воздействие внутренних сил на экзодина-

Общая площадь, высота и соотношение площадей главных

Континенты	Общая площадь, млн. км ²	Средняя высота над уровнем моря, м	Максимальная высота над уровнем моря, м	Минимальная высота над уровнем моря, м
Австралия с Океаний	9	340	5040 (Карстена)	-12 (оз. Эйре)
Азия	42	960	8882 (Эверест)	-394 (Мертвое море)
Северная Америка	24	720	6187 (Мак-Кинли)	-90 (оз. Салтон)
Южная Америка	18	590	7040 (Аконкагуа)	-30 (Рио-Негро)
Антарктида	14	3000	4702 (Маркхам)	
Африка	30	750	6010 (Кибо)	-170 (оз. Ассал)
Европа	12	340	5641 (Эльбрус)	-28 (Каспийское море)
Суша в целом	149	850	8882 (Эверест)	-394 (Мертвое море)

мику земной коры оказывается сопоставимым с действием внешних воздействий, подобных по мощности некоторым основным биохимическим процессам в почвенно-элювиальном слое.

Роль внутриземных источников энергии в экзодинамическом преобразовании равнин, как правило, не так значительна, как в горах. Использование формул В. В. Звонкова для расчета сил сопротивления движению частиц грунта, перемещающихся в небольших водных потоках под уклон в первые градусы, показывает, что теряемая частицами потенциальная энергия на два порядка уступает по величине работе, которая затрачивается на изменение их латерального положения.

Посмотрим теперь, в каком соотношении находятся энергетические показатели некоторых важнейших процессов, с которыми связана геодинамика и, в частности, экзодинамика земной коры (табл. 2).

Таблица 2
Оценка мощности некоторых важнейших планетарных процессов

Процессы	Единица измерения	
	10 ²¹ Дж/год	10 ⁹ Дж/см ² ·год
Солнечное излучение:		
поглощение у верхней границы тропосферы	3559	700
эвапотранспирация растительности суши	117	77,9
аккумуляция в чистой первичной продукции суши	2,1	1,38
накопление в почвенно-элювиальном слое	0,4	0,54
Морские приливы	0,029	—
Кондуктивный тепловой поток Земли	0,80	0,155
Энергия землетрясений	0,005	—
Гравитационная энергия *	0,000 38	0,000 25
Энергия, вырабатываемая человеком	0,21	0,04

* Для неледниковой суши.

Таблица I

высотных ступеней суши и частей света (по Б. Г. Розанову, 1977 г.)

Процент от общей площади континента территорий с высотами над уровнем моря, м				Соотношение главных видов поверхности, %		
<200	200—1000	1000—2000	>2000	Равнины	Горы без ледников	Ледники и снежники
36	60	3	1	91	8,99	0,01
26	32	28	14	52	47,3	0,7
25	36	30	9	48	45	7
41	42	12	5	77	22,93	0,07
24 (<1000 м)		76 (>1000 м)		—	1	99
16	30	50	4	76	23,9999	0,0001
57	33	8	2	80	19,91	0,09
—	—	—	—	70	21	9

Итак, сравнение энергообеспеченности некоторых важнейших процессов, с которыми связана экзодинамика земной коры*, показывает полное превосходство тех из них, которые осуществляются за счет солнечного излучения.

ДИНАМИКА

Природные экзодинамические процессы в пределах неледниковой суши производят преимущественно разрушительную работу. Аккумуляция вещества устойчиво осуществляется обычно лишь в озерах, болотах, дельтах и эстуариях рек. В более ограниченных масштабах она идет на днищах речных долин, находящихся в констративной фазе, на различного рода террасах и пологих склонах, особенно в их основании, в карстовых воронках, полях и провалах. О том, что неледниковая суша представляет собой арену преобладающей денудации, свидетельствует огромное превышение массы удаляемых с нее продуктов экзодинамического разрушения над привносом вещества на нее из внешних источников.

Тектонический фактор обуславливает деление суши на более подвижные горные и относительно стабильные равнинные территории. Распределение подвижных поясов на земном шаре определяет деление суши на крупные водосборные бассейны. Однако размеры последних зависят в первую очередь от того, как велики примыкающие к поясам гор континентальные равнины.

Горные территории, как уже указывалось, в природных условиях в среднем денудируются на порядок быстрее, чем равнинные. Большинство горных поясов суши являются областями тектонического скупивания литосферных масс, результатом громад-

* Совершенно неочтенным является участие в экзодинамических процессах сил, связанных с вращением Земли или с так называемым эффектом Корнолиса.

ного тангенциального сжатия последних. В рельефе гор хорошо проявляются обусловленные тектоникой поднятия и опускания, флексуры и разрывные дислокации, планетарная система тектонических линий без видимого смещения по ним. По сути дела рельеф гор — это акцентированный денудацией слепок их тектонической структуры.

Равнинно-платформенные территории занимают консолидированные блоки континентальной коры. Различие в их гипсометрическом положении во многом связано с неодинаковым знаком и скоростями тектонических движений. Особенности тектонического плана этих территорий увязываются с крупными чертами их рельефа. Реки, дренирующие равнины, приспособляются к особенностям их морфоструктуры, подчеркивая древние и новейшие дислокации. Таким образом, в пределах всей суши деятельность экзодинамических процессов определенным образом отражает эндодинамику земной коры. В то же время процессы ее внешней динамики целым рядом своих особенностей обязаны климатическому фактору, от которого зависит распределение тепла и влаги на земной поверхности. Эта зависимость отчасти проявляется даже при рассмотрении перечня экзодинамических процессов суши (табл. 3), хотя основным для их выделения всегда был динамический критерий.

Из приведенной таблицы видно, что среди действующих на суше экзодинамических процессов универсальными, т. е. поверхностными и подземными, являются биогенные, биогенно-элювиальные, элювиальные (небиогенные), суффозионные и карстовые. Остальные процессы относятся к категории поверхностных.

Очень важными характеристиками являются интенсивность процесса и его геоморфологическая приуроченность. Оба показателя количественные. Первый может быть отнесен к единице площади и тогда он выражается через массу или объем вещества, трансформированного выветриванием, снесенного или аккумулярованного в единицу времени. Иногда интенсивность процесса дается в миллиметрах в год и если этой величиной выражается снос, то он может определяться и количеством лет, которое необходимо для срезания 1 м горных пород с данной площади («денудационный метр»). К сожалению, при переводе единиц массы в объемные и линейные единицы средняя плотность скелета горных пород одними приравнивается к 2, а другим к $2,5 \text{ г/см}^3$. Некоторые исследователи снижение поверхности на 1 см соотносят с удалением слоя с плотностью скелета $1,25 \text{ г/см}^3$. Из-за этого при сопоставлении данных различных авторов допускаются искажения. Во избежание последних необходимо пользоваться показателями, включающими единицы массы.

При разделении поверхности суши на сферы действия различных процессов оказывается, что это можно сделать только

Перечень природных экзодинамических процессов суши

Процессы	Поверхностные	Подземные	Основные особенности проявления
Биогенные	+	+	Формирование биомассы, аккумуляция продуктов жизнедеятельности и отмирания организмов, создание ими построек
Биогенно-элювиальные	+	+	Преобразование горных пород организмами при участии небогенных факторов (механическое разрушение корнями, «корневой снос», биохимическое выветривание, почвообразование и др.)
Элювиальные (небиогенные)	+	+	Преобразование горных пород под воздействием колебаний температуры, расклинивающего действия водных пленок, льда и химических агентов
Карстовые	+	+	Химическое и биохимическое преобразование карбонатных пород и эвапоритов с образованием специфических полостей и натеков Оседание и проваливание горных пород в подземные карстовые пустоты Эрозионно-аккумулятивные процессы в карстовых тоннелях
Суффозионные	+	+	Механический вынос подземными водами частиц и преобразование горных пород при их перемещении
Флювиальные	+	—	Эрозионно-аккумулятивные процессы, осуществляемые реками и ручьями
Пролувиальные	+	—	Эрозионно-аккумулятивные процессы, осуществляемые временными русловыми потоками
Селевые	+	—	Деятельность водно-каменных, грязе-каменных, грязевых и водно-снежно-ледовых потоков
Гляциальные	+	—	Экзарационная и аккумулятивная деятельность ледников
Лавинные	+	—	Разрушительная и аккумулятивная деятельность снежных лавин
Обвальные	+	—	Камнепады, обвалы
Осыпные	+	—	Движение обломков в основном путем соскальзывания
Оползневые	+	—	Скольжение блоков и масс горных пород, часто включающее их медленное перетекание
Делювиальные	+	—	Площадной смыв и намыв при снеготаянии и дождях на слабо наклонных поверхностях и склонах
Дефлюкционные	+	—	Медленное дифференцированное перемещение частиц сильно увлажненных дисперсных почв на задернованных склонах вблизи поверхности

Процессы	Поверхностные	Подземные	Основные особенности проявления
Солифлюкционные	+	—	Вязкопластическое и вязкотекучее перемещение переувлажненных дисперсных грунтов
Десерпционные (крип)	+	—	Медленное перемещение скелетных грубообломочных масс
Гидротермические движения	+	—	Пучение и осадка
Формирование бугров пучения	+	—	Пучение, сопровождающееся латеральным притоком вещества
Термокарст	+	—	Протаивание льдистых пород с понижением поверхности многолетней мерзлоты
Развитие наледей	+	—	Сортировка и деформация вещества в зоне наледи
Формирование полигонально-жильных структур	+	—	Образование полигонов клиновидных тел: ледовых или грунтовых
Озерные	+	—	Абразивная деятельность, перенос вещества, аккумуляция в озерах
Эоловые	+	—	Всевозможные виды деятельности ветра

для различных видов сноса и аккумуляции, да и то не в полной мере. Процессы выветривания осуществляются практически повсеместно и поэтому при их изучении задача состоит в дифференциации поверхностей по интенсивности и специфике дезинтеграции горных пород.

ПРИРОДНЫЕ ЭКЗОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ПЭС) И КОМПЛЕКСЫ (ПЭК)

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Целостное восприятие эффекта экзодинамических процессов в пределах неледниковой суши невозможно без знания их совокупного действия. Представление о действии на ее территории определенных сочетаний процессов внешней динамики с давних пор развивается советскими и зарубежными геоморфологами. И. С. Щукин пишет о существовании на суше морфологических комплексов, отличающихся друг от друга «качественным составом» (выделено И. С. Щукиным) действующих в них рельефообразующих сил или по крайней мере тем, что в данном типе какая-то сила играет подавляющую роль, тогда как в других основных типах эта основная роль может быть сведена до минимума» [45]. На то, что экзодинамические процессы образуют определенные, зависящие от природных условий сочетания, указывают французские геоморфологи. Согласно А. Шоллею, в образовании рельефа всегда принимает участие комплекс агентов, составляющих систему эрозии, обусловленную климатом. Ж. Трикар и А. Каё называют комбинации процессов, тесно связанные с зональностью, а следовательно, и с биогенным фактором, морфогенетическими системами.

По наличию различных морфогенетических систем в пределах неледниковой суши этими авторами [50] выделены следующие морфоклиматические зоны: 1) перигляциальная в пределах области многолетнемерзлых пород; 2) перигляциальная вне этой области; 3) лесная в области многолетнемерзлых пород; 4) лесная приморских областей средних широт (без суровых зим); 5) лесная областей средних широт (с суровыми зимами); 6) лесная средиземноморского типа; 7) степей и сухих прерий (без суровых зим); 8) степей и сухих прерий (с суровыми зимами); 9) пустынь и полупустынь (с суровыми зимами); 10) пустынь и полупустынь (без суровых зим); 11) саванн; 12) тропических лесов и 13) с существенной ролью вертикальной ландшафтной поясности. Важной особенностью этого деления является учет Ж. Трикаром и А. Каё различий морфогенетических систем в зависимости от степени криогенного изменения поверхностных образований в средних и высоких широтах.

Самая обстоятельная отечественная сводка по проблеме зависимости экзодинамики суши от климата принадлежит А. П. Дедкову, В. И. Мозжерину, А. В. Ступишину и А. М. Тро-

фимову [14]. Ее авторы подразделили равнинную сушу на климато-геоморфологические (морфоклиматические) зоны по степени выраженности ряда экзодинамических процессов в различных ландшафтных зонах. Поэтому границы некоторых из них приняты в качестве границ морфоклиматических подразделений.

Выделенные морфоклиматические зоны, согласно А. П. Дедкову с соавторами, имеют следующие наименования и характеристику.

1. Гляциальная — зона, где сочетаются ледниковые планация и расчленение и происходит самая большая на земном шаре физическая денудация.

2. Перигляциальная — зона, в которой происходит криопланация, осуществляющаяся как путем выполаживания склонов, так и путем криопедиментации. Интенсивный площадной снос ведет к снижению водоразделов и заполнению продуктами денудации днищ долин.

3. Гумидная умеренная — зона, для которой характерно интенсивное долинообразование. В этой зоне продольные профили рек наиболее хорошо выработаны, на междуречьях господствует химическая дезинтеграция и удаление вещества горных пород, процессы механического разрушения и перемещения вещества идут в долинах.

4. Семиаридная — зона педиментации и интенсивной эрозии временных водотоков.

5. Аридная — зона, где сохраняется реликтовый рельеф, выработанный в механически стойких породах.

6. Семигумидная тропическая — зона педипланации саванного типа. Здесь происходит наиболее интенсивное формирование поверхностей выравнивания, максимальные эрозия и сток взвешенных наносов.

7. Гумидная тропическая — зона пенеипланации и интенсивного корообразования.

А. П. Дедков указывает, что морфогенез ряда зон носит смешанный характер. Так, в областях умеренного пояса с резко континентальным климатом и вечной мерзлотой сочетаются перигляциальный и гумидный умеренный типы морфогенеза. А. П. Дедков считает, что горным территориям свойственны такие же морфоклиматические зоны. Однако большее значение гравитационной составляющей экзодинамических процессов приводит к усилению в них физической денудации и меньшей сохранности реликтовых форм. Существование морфоклиматических поясов в горах показано в работах М. И. Ивероновой, Э. Э. Титова, Г. С. Ананьева и др.

Создание геоморфолдами Казанского университета модели морфоклиматического деления равнинной суши несомненно способствует более углубленному пониманию совокупного действия экзодинамических процессов и их результатов, запечатленных

в строении рельефа и поверхностных отложений*. В то же время принципы ее построения и вкладываемое содержание вызывают ряд замечаний.

В настоящее время количественное изучение суммарного эффекта экзодинамических процессов включает сведения о сносе и аккумуляции ими вещества в пределах того или иного представительного участка. Такая информация может быть получена на основе ряда данных, в которые обязательно должны входить показатели скорости сноса и аккумуляции вещества различными геологическими агентами и размеры площадей их действия. Подобного рода работы выполнены, например, М. И. Ивероновой и В. А. Хирсановым в СССР и А. Раппом в Швеции. Однако они весьма трудоемки, поэтому редки и их пока явно недостаточно для морфоклиматического деления суши. А. П. Дедков и соавторы оперировали только цифрами скоростей процессов без количественных данных об их площадном развитии. В силу этого построенные ими спектры интенсивности экзодинамических процессов различных ландшафтных зон не отражают истинных соотношений между результатами деятельности процессов. А раз так, то вряд ли была необходимость в применении математических методов для анализа спектров. Созданная в итоге модель морфоклиматического деления равнинной суши не основана на количественных показателях в том смысле, какой им придают А. П. Дедков и соавторы.

Отсутствие представительных количественных характеристик работы экзодинамических процессов внутри каждой ландшафтной зоны на равнине или пояса в горах вынуждает искать иной критерий оценки их суммарного эффекта.

Решение данного вопроса связано с более общей задачей — проблемой деления наследниковой суши на площади, сходные по характеру и условиям взаимодействия экзодинамических процессов. К разрешению этой задачи можно подойти на основе сведений об автономности одних и подчиненности других сочетаний экзодинамических процессов в пределах различных подразделений суши.

Подобный прием использован М. А. Глазовской [7] при выработке принципов деления суши на ландшафтно-геохимические системы. Она указывает, что разнообразные природные тела (горные породы, кора выветривания, рыхлые наносы, почвы, воды, животные и атмосфера) той или иной территории связаны встречными потоками вещества и энергии в единое целое и формируют различные по степени сложности, устойчивости, тесноте обратных связей и типам функционирования природные ландшафтно-геохимические системы. По уровням организации и тес-

* Поверхностными именуется осадочные образования, подчиняющиеся в своем распространении особенностям строения рельефа и фиксирующие его грани (поверхности).

ноте обратных связей они делятся на элементарные и каскадные. Элементарная ландшафтно-геохимическая система (ЭЛГС) — это территория, в пределах которой качественный и количественный составы, а также скорость миграционных потоков элементов между компонентами ландшафта обладают сходством в той степени, в какой это обеспечивает единообразие структуры и функционирование данной ландшафтно-геохимической системы на всем занимаемом ею пространстве. В пределах ЭЛГС обратные геохимические связи между компонентами ландшафта (блоками системы) более интенсивны, чем внешние геохимические связи данной ЭЛГС в целом с другими ландшафтно-геохимическими системами. Блоки ЭЛГС (атмосфера, литосфера, воды) — это трехфазные тела с преобладанием какой-либо одной фазы: газовой, твердой или жидкой, или примерно равным соотношением их, как, например, в почве. Миграция веществ между блоками ЭЛГС идет во всех фазовых состояниях. Кроме того, в каждом блоке системы имеется особая «четвертая фаза» — совокупность живых организмов (живое подсистему). Каждый блок системы представляет в свою очередь подсистему, в пределах которой осуществляется обмен вещества и энергии между фазами и населяющими данный блок живыми организмами» [7].

Находящиеся на разных гипсометрических уровнях элементарные ландшафтно-геохимические системы объединяются в каскадные (КЛГС). Элементарные ландшафтно-геохимические системы, занимающие наиболее высокое положение, являются автономными, а находящиеся на более низких гипсометрических уровнях оказываются геохимически подчиненными и делятся на транзитные системы и системы конечных звеньев. Каскадные системы могут быть открытыми с конечным сбросом веществ в моря и океаны, и закрытыми, привязанными к бессточным впадинам. По характеру сочетания в них элементарных звеньев они подразделяются на каскадные системы: 1) линейные, 2) рассеяния и 3) концентрации.

Знание особенностей функционирования различных ландшафтно-геохимических систем земной поверхности, как указывает М. А. Глазовская, позволяет прогнозировать их реакцию на поступление в них потоков техногенных веществ. Поскольку главное место в таком прогнозе занимает предсказание влияния последних на совокупность живых организмов, различные прогнозные группы природных ландшафтно-геохимических систем рассматриваются как неодинаковые по устойчивости технобиогеомы.

Концепция М. А. Глазовской весьма полно и хорошо отражает многие важнейшие особенности структуры перераспределения вещества между земной корой (блоки элементарной ландшафтно-геохимической системы «почва», «воды грунтовые» и «литосфера»), атмосферой (блок «атмосфера») и гидросферой

(блок «воды поверхностные»), поскольку она создана с учетом обусловленного орографическими и климатическими факторами каскадного характера его миграции и трех вариантов строения каскадов.

Использованное в концепции представление об автономности одних и подчиненности других участков территории земного шара, о начальных, промежуточных и конечных блоках системы перераспределения вещества на нем можно положить в основу глобальной модели экзодинамики неледниковой суши.

ПРИНЦИПЫ ВЫДЕЛЕНИЯ

Ведущая роль в экзодинамике земной коры принадлежит воде. Поэтому сведения о неравномерности распределения воды можно использовать для деления земной поверхности на резко различные по условиям экзодинамического преобразования территории. Последние могут рассматриваться как крупнейшие таксоны — природные экзодинамические системы (ПЭС) с характерными для каждой из них условиями экзодинамики. Таких типов территорий четыре. Это площади: 1) под водами Мирового океана и крупных озер и в зонах их побережий; 2) под материковыми ледниками и у их краев; 3) экстрааридные, подверженные в основном эоловым процессам, и 4) массовых площадного и линейного движений вещества в условиях действующих бассейново-речных систем. Таким образом, неледниковая суша в основном оказывается занята бассейново-речными и на меньшей площади озерными и ветровыми (эоловыми) ПЭС. Узкая полоса побережья Мирового океана не входит в их состав, так как она формируется под воздействием работы моря.

Основными компонентами ПЭС являются потоки вещества — литосферные, гидросферные и атмосферные. Поэтому любая ПЭС охватывает приповерхностную часть земной коры, поверхностные воды и часть атмосферы — все те области, в которых наиболее активно осуществляется функционирование экзодинамических потоков вещества.

Потоки вещества являются важнейшими «заполнителями» ПЭС. Однако, если в бассейново-речных ПЭС они возникают в основном за счет автохтонного материала, то в функционировании проточно- и бессточно-озерных ПЭС велика роль вещества, привнесенного из смежных ПЭС, которые занимают более высокое гипсометрическое положение. Привнос вещества извне может существенно сказываться и на работе отдельных звеньев эоловых ПЭС. Таким образом, по воздействию аллохтонного материала все ПЭС можно разделить на три категории: 1) условно автономные (бассейново-речные), 2) зависимые (озерные) и 3) незначительно зависимые (эоловые).

Ключом к разделению неледниковой суши на три типа ПЭС является различие в характере движения обломочного материала. В пределах любой бассейново-речной ПЭС формируется сходящийся поток вещества, имеющий в плане древовидную форму. Если такой поток прерывается и в основном поглощается озерной котловиной, то последняя должна рассматриваться как озерная ПЭС. Движение вещества и в первую очередь обломочного материала внутри озерной ПЭС оказывается иным и в конечном итоге представляет собой центростремительную миграцию его от берегов в наиболее глубокие части дна — озерные седиментационные бассейны. Следует подчеркнуть, что небольшие озера, не оказывающие существенного воздействия на бассейново-речной поток вещества, должны рассматриваться как составляющие бассейново-речных ПЭС.

Эоловые ПЭС резко отличаются от рассмотренных выше. Внутри них дальний перенос вещества осуществляется ветром и, как следствие этого, эоловые потоки проходят более широкими полосами, могут менять направление и, следовательно, не обязательно зависят от направления уклона местности.

Природные экзодинамические системы обычно объединяют территории более низкого ранга, которые рассматриваются как природные экзодинамические комплексы (ПЭК). Внутри крупных бассейново-речных ПЭС такие комплексы образуют своего рода каскады. Автономными блоками таких ПЭС можно считать их части, характеризующиеся сходством климатических условий и, как следствие этого, примерно однотипным сочетанием экзодинамических потоков вещества. Каждая такая территория, образованная междуречьями и дренирующей их долиной сетью, может именоваться водосборным ПЭК.

Разнообразные водосборные ПЭК объединяются главной долиной и ее крупнейшими ответвлениями. Долинная сеть собирает материал из различных водосборных ПЭК, поэтому собирающие долины-каналы вместе с тесно связанными с ними прилегающими придолинными территориями рассматриваются как долинные ПЭК. Устьевые и наземные дельты, замыкающие снизу речные долины, также представляют собой подразделения ранга ПЭК. Это наземно-дельтовые, приозерно- и приморско-дельтовые ПЭК. Мелкие изолированные водосборы, соответствующие водосборным ПЭК бассейново-речных систем, но непосредственно открытые в Мировой океан или крупное озеро, могут рассматриваться как простые бассейново-речные ПЭС. Сложные бассейново-речные ПЭС состоят из соподчиненных блоков: водосборных, долинных и часто дельтовых ПЭК.

Функционирование бассейново-речных ПЭС сильно отличается в зависимости от их орографической приуроченности. На равнинах различные по климатическим условиям водосборные ПЭК растянуты по площади, тогда как в горах они сближены и располагаются в соответствии с лестницей вертикаль-

ных ландшафтных поясов. Большие уклоны почти у всех поверхностей рельефа в горах обуславливают ускоренное развитие большинства экзодинамических процессов. Поэтому бассейново-речные ПЭС можно делить на горные, равнинные и горно-равнинные.

Озерные ПЭС необходимо делить на проточно-озерные и бессточно-озерные, а также горные и равнинные.

БАССЕЙНОВО-РЕЧНЫЕ ПЭС

Речные бассейны как специфические системы мобилизации, интеграции и выноса вещества изучаются сравнительно недавно. Системный подход при их исследовании применили американские ученые, задачей которых являлась прогнозная оценка сноса обломочного материала с территории 48 смежных штатов США [47]. В СССР изучение речных бассейнов как эрозионно-денудационных морфосистем осуществлено Ю. Г. Симоновым и О. А. Борсуком [34].

Ниже кратко рассматриваются принципы выделения и основные особенности функционирования трех блоков бассейново-речных ПЭС, какими являются водосборные, долинные и дельтовые ПЭК.

Водосборные ПЭК

Закономерности функционирования бассейново-речных ПЭС могут быть поняты лишь на основе изучения сочетаний экзодинамических процессов различных водосборных ПЭК. Структура и состав экзодинамических потоков вещества внутри водосборных ПЭК как в горах, так и на равнинах зависят от климата. Однако значительные коррективы в эту зависимость вносят, кроме того, различия в геологическом строении, сейсмических условиях, а также наличие или отсутствие вулканических и некоторых других эндодинамических явлений.

Влияние климата на экзодинамические процессы проявляется в первую очередь через особенности ландшафта. Для выявления этой связи, помимо конкретных данных о специфике различных экзодинамических процессов и соответствующих им потоков вещества в разных морфоклиматических зонах и поясах, удобно использовать сведения о неодинаковом характере взаимодействия двух видов поверхностного движения вещества в их пределах: 1) более или менее автономного площадного — склонового и 2) подчиненного ему линейного — долинного. Такое взаимодействие может быть отражено не менее чем тремя различными состояниями долинной сети водосборных ПЭК. Эти состояния таковы: 1) преимущественное врезание, имеющее место при отрицательном балансе вещества на днищах долин; 2) почти повсеместная агградация, происходящая при положительном

балансе вещества в долинах; 3) агградация верхних и врезание нижних звеньев долинной сети, осуществляющиеся в условиях смены положительного баланса вещества на отрицательный при объединении мелких долин в более крупные.

Водосборные ПЭК, внутри которых происходит преимущественное углубление долинной сети, можно отнести к типу врезания, а внутри которых осуществляется ее почти повсеместная агградация — к типу планации. Такие наименования отражают отставание снижения междуречий от углубления долин (тип врезания) и обратное соотношение в развитии системы междуречье — дно долины (тип планации). Водосборные ПЭК с разнонаправленным развитием различных звеньев можно отнести к типу планации и врезания.

Перечисленные три динамических типа водосборных ПЭК характерны как для горных, так и для равнинных территорий.

Равнинные ПЭК врезания

Такие комплексы свойственны областям жаркого и умеренного гумидного климата, которым присуща лесная или лесостепная растительность. Между комплексами врезания жаркого и умеренного поясов существует значительная разница.

Условия гумидного и семигумидного жаркого климата. В жарком гумидном климате под пологом леса осуществляются самые мощные на Земле биогенные процессы. Фитомасса здесь достигает 400—500 т/га, а чистая первичная продукция 25—30 т/га·год [29, 30]. Радиационный баланс составляет 290—330 кДж/см²·год, а коэффициент увлажнения превышает 150. Последний показатель, согласно Н. Н. Иванову, представляет собой отношение (годовые осадки : испаряемость) × 100 %.

Густота дождевых тропических лесов в 3—4 раза превышает плотность покрытия поверхности лесами умеренного пояса. В тропических лесах почва как нигде хорошо защищена от прямого воздействия ветра, атмосферных осадков, колебаний температур и прямого нагрева солнечными лучами. В целом применительно к полноценным лесным сообществам установлено, что скорость ветра в них колеблется в пределах 1/10—2/3 скорости ветра на открытом месте. В сомкнутых участках леса интенсивность солнечной радиации может составлять всего 1 % от ее общего поступления. Летом средние суточные максимумы температур на поверхности почвы в лесу могут быть на 20—28 °С ниже, чем на почве вне лесонасаждения [21].

Несмотря на огромное количество осадков (более 2000 мм/год), они почти не производят смыва с поверхности почвы в областях распространения постоянно влажных и листопадно-вечнозеленых лесов. Внутрипочвенный сток в таких лесах,

по данным Ж. Трикара, может составлять до 97—99 % от массы общего слоя стока.

Оптимальный температурный режим на поверхности (30—35 °С) и в грунтах (25—30 °С) позволяет микроорганизмам разрушать опад и другие органические продукты, вырабатываемые растительным и животным миром, с огромной скоростью. Это приводит к насыщению грунтовых вод органическими и неорганическими соединениями, при участии которых и осуществляется интенсивное преобразование материнских пород в глинистую кору выветривания. Приведем определение «коры выветривания», которое хорошо отражает ее сложную природу. Под ней К. К. Никитиным понимается комплекс горных пород, образовавшихся в континентальных субаэральных условиях в результате процессов гипергенного метасоматического изменения исходных горных пород верхней части литосферы, которые под воздействием климатических, гидрогеохимических, биохимических и геологоструктурных факторов стремятся к равновесному состоянию в термодинамической обстановке земной поверхности. Более широко условия образования коры выветривания трактовал И. И. Гинзбург, указывавший, что она формируется в обстановке субаэральных, супераквальных или подземных режимов.

В полно развитом профиле выветривания снизу вверх выражены: 1) зона механической дезинтеграции, начальной гидратации и выщелачивания пород; 2) зона выщелачивания пород, в которой образуются гидратированные слоистые алюмосиликаты — гидрослюда, гидроксиды и вермикулиты; 3) зона гидролиза минералов: образование гидролизovaných силикатов железа и алюминия, монтмориллонита, каолинита и галлуазита; 4) зона конечного гидролиза: формирование простых окислов и гидроксидов элементов гидролизатов (железа, алюминия, титана и др.). Кора выветривания полного профиля возникает в условиях хорошего дренажа, а в тех случаях, когда он ослаблен или, напротив, чрезмерно интенсивен, в профиле выветривания могут отсутствовать верхняя или средняя, а иногда и обе средние зоны.

Глубина биохимического преобразования горных пород, достигающая обычно десятков метров, сильно варьирует даже на ограниченных площадях в зависимости от изменения гидрогеологических условий. Поэтому подошва коры выветривания обычно имеет изрытую, очень неровную форму. В зонах разломов площадная кора выветривания может переходить в линейную мощностью иногда до первых сотен метров.

Согласно В. М. Фридланду [38], по минералогическому составу тропические коры выветривания делятся на следующие разновидности: 1) аллиты — коры с резким преобладанием минералов-окислов алюминия над минералами-окислами железа; 2) ферралиты — коры, в которых не выявляется резкое преоб-

ладание одной из двух указанных групп минералов; 3) альферриты — коры, в которых резко преобладают окислы железа, а окислы алюминия содержатся в ничтожных количествах. Кроме этих трех групп кор выветривания, выделяются сиаллитные и сиаллитно-ферритные коры, характеризующиеся невысокой степенью преобразованности первичных минералов. Промежуточные разности, содержащие значительные количества как слабо преобразованных первичных, так и вторичных (глинистых минералов и минералов-полуторных окислов) минералов, именуется ферраллитизированными корами выветривания. Кроме того, существуют кварцевые и высококварцевые группы кор выветривания, а также маргалитовые и ферримаргалитные коры выветривания. Первые богаты монтмориллонитом; а вторые еще и окислами железа [38].

Наличие мощных глинистых кор выветривания в равнинных областях с гумидным жарким климатом указывает на достаточную консервативность рельефообразующих процессов в их пределах. Это подтверждается расчетами И. И. Гинзбурга, а также Ю. Ю. Бугельского, показывающими, что превращение исходной кристаллической породы основного или ультраосновного состава в элювиальную глину в указанных условиях осуществляется со скоростью около 0,033 мм/год.

Исследования, выполненные недавно Ю. Ю. Бугельским с соавторами, показали, что в глинистых корках выветривания широко распространены тионовые и нитрифицирующие бактерии, использующие для своего питания восстановленные соединения серы и азота. Жизнедеятельность этих микроорганизмов сопровождается резким понижением кислотности подземных вод (от pH 3,0—4,7 до 2,4). Это обстоятельство делает биохимическое выветривание в несколько раз интенсивнее, чем если бы оно осуществлялось в тех же условиях без участия бактерий.

Несмотря на увеличение пористости и плотности породы при биохимическом изменении, длительный вынос вещества материнского субстрата подземными водами приводит к постепенному оседанию по вертикали покровов коры выветривания. Пример такого снижения рельефа приводит А. Трендаль. Он вычислил, что 10-метровый слой латеритов выровненных между речей Уганды образовался в результате переработки и срезания 200-метровой толщи гранитов. И. В. Витовская и Н. Н. Лавренова подсчитали, что при образовании мощной, хорошо развитой коры выветривания на ультраосновных породах объем ее верхних горизонтов оказывается значительно меньшим по сравнению с первоначальным субстратом. Зона нонтронитизированных серпентинитов занимает примерно $\frac{1}{2}$ часть первоначального пространства, выше расположенная зона охр — $\frac{1}{4}$ часть.

Площадное минеральное перемещение материала коры выветривания осуществляется в форме солифлюкции. Интенсивное круглогодичное увлажнение приводит к тому, что отчетливые

солифлюкционные наплывы наблюдаются даже на очень пологих поверхностях [30]. Кроме того, верхняя часть почвы, как показали стационарные наблюдения Л. Луиса, повсеместно испытывает медленное дефлюкционное перемещение.

Существенное распространение имеют мелкие эрозионные формы и привязанные к ним небольшие оползни и оплывины. Оползание широко развито и в пределах нижних частей склонов речных долин.

Линейное перемещение обломочного материала начинается в достаточно разветвленных эрозионных ложбинах, которые привязаны к днищам долин более высоких порядков. Незначительное поступление в пределы последних обломочного материала в форме глинистых, илистых и тонкопесчаных частиц определяет высокий эрозионный потенциал рек. Однако почти полное отсутствие абразивного материала, роль которого в руслах обычно выполняют грубообломочные наносы, обуславливает неразработанность продольных профилей даже у крупных рек. Лишь местами в реках встречаются гравийники и мелкие галечники олигомиктового — кварц-кремнисто-кварцитового состава. С этим же связано наличие на реках порогов и водопадов. Благодаря почти сплошному развитию рыхлых образований в бортах долин и высокой эрозионной способности речных вод происходит интенсивная разработка поперечного профиля долин. Таким образом, в условиях приподнятого рельефа долинная сеть из-за низкой эффективности эрозионных процессов длительное время может находиться в инстративной фазе и, как правило, переходит в перстративную фазу лишь при достижении очень незначительных уклонов.

Оценки скоростей денудации равнин влажного жаркого климата, полученные В. Вундтом и Ж. Корбелем по данным о минеральном стоке рек, колеблются от 0,012 до 0,021 мм/год. При этом вынос продуктов денудации в растворенной форме с таких территорий обычно в несколько раз превосходит их удаление в обломочной форме.

Общими особенностями экзодинамических процессов водосборного ПЭК в условиях равнин с постоянно влажным жарким климатом являются: 1) большая интенсивность биогенных и биогенно-элювиальных процессов, с которой связано наличие мощных площадных, а местами линейных глинистых кор выветривания; 2) малая интенсивность площадного механического сноса, осуществляющаяся в форме солифлюкции, дефлюкции и локально действующих оползневых процессов; 3) отрицательный баланс обломочного материала на днищах долин и его, как правило, мелкоземистый, существенно глинистый состав; 4) опережение процессами врезания долин опускания междуречий в условиях достаточно высокого положения базиса эрозии.

Водосборные ПЭК, свойственные условиям жаркого постоянно влажного климата, похожи по своим основным особенностям

на такие же ПЭК, относящиеся к залесенным территориям жаркого переменного-влажного климата, хотя в пределах последних, согласно Ю. П. Селиверстову, отмечается появление плоскостного смыва. Однако сильному развитию этого процесса мешает блокирующее действие древесной растительности, представленной здесь лесами, частично или полностью теряющими листву в сухой период, но возобновляющими ее до начала периода дождей. В то же время нельзя недооценивать того, что осязаемое количество вещества может выноситься в составе смываемых иногда листьев и других растительных остатков. Если даже 2 % массы опада листопадных лесов удаляется из пределов водосборов, то это эквивалентно изъятию из них 2 т/км²·год зольных веществ. В целом скорость снижения рельефа под пологом листопадных лесов для Кении оценена Данне с соавторами в 22 т/км²·год. Меньшая интенсивность биогенных процессов в условиях жаркого переменного-влажного климата тропиков и субтропиков и в условиях постоянно влажных субтропических лесов несколько уменьшает масштабы биохимического выветривания, а в определенных случаях и видоизменяет его специфику. Еще более ощутимыми должны быть изменения в процессах выветривания, идущих под пологом природной субтропической травянистой хорошо развитой растительности. Однако во всех случаях в действии сочетания экзодинамических процессов в условиях жаркого и теплого гумидного и семигумидного климата сохраняется тенденция к врезанию долинной сети и формированию площадной достаточно мощной и глубоко преобразованной биохимической коры выветривания глинистого состава.

Условия гумидного и семигумидного умеренного климата. В умеренном поясе водосборные ПЭК развиваются по типу врезания в областях с лесной и лесостепной растительностью. Однако наличие суровых зим и в особенности многолетнемерзлых пород в континентальных секторах в условиях такой же растительности приводит к изменению типа водосборных ПЭК и трансформации их в ПЭК планации и врезания.

Радиационный баланс умеренного пояса обычно достигает 125—210 кДж/см²·год, фитомасса лесной растительности составляет 150—340 т/га, а ее чистая первичная продукция 6,5—12,6 т/га·год. В лесостепной зоне запасы фитомассы на полпорядка — порядок меньше, однако масса чистой первичной продукции в ней мало отличается от прилежащих лесных территорий.

Одной из важнейших особенностей рассматриваемых ландшафтных подразделений является сочетание хорошо развитого растительного покрова с емкой почвенной подстилкой, масса которой в среднем составляет 6—12 т/га. Подстилка обеспечивает перевод почти всех достигающих почву осадков во внутрипочвенный и более глубокий подземный сток. Тем самым она

препятствует механическому смыву, который мог бы иметь большие размеры в период снеготаяния. Некоторое количество обломочного материала, которое все же захватывают поверхностные талые воды, в основном улавливается и накапливается в подстилке. Распределение осадков (в %), выпадающих на лесные территории умеренного пояса, согласно В. А. Побединскому [28], выглядит следующим образом:

задерживается кронами	30
поверхностный сток	5
физическое испарение и десукция напочвенным растительным покровом	10
почвенный сток	10
десукция древесным пологом	30
грунтовый сток	15

Промерзание почв в лесостепной и лесной зонах европейской части СССР обычно распространяется до глубин 0,5—1,2 м. Таким образом, зона физического выветривания здесь полностью перекрывается биогенно-элювиальной зоной, прослеживающейся обычно до глубин в первые метры. Поэтому массовое формирование грубообломочного физического элювия в подобных условиях идет лишь на обнаженные и слабо защищенные растительностью склонах, сложенных скальными породами.

Делювиальный смыв под пологом леса в умеренном поясе имеет ничтожные размеры. Так, на облесенных склонах Воронежской области он равняется 0,01—0,03 т/км²·год [28]. В нарушенных и рационально эксплуатируемых лесах востока США, по данным Дж. Патрика, поверхностный смыв колеблется от 3 до 34 т/км²·год. Слабо развит делювиальный смыв и при наличии густой травянистой растительности. В одних случаях отмечается его почти полное отсутствие, как это имеет место на дерновых склонах крутизной от 3 до 9° на юге Русской равнины [6]. Для условий США, как указывает Х. Беннет [2], хорошо защищенные травянистой растительностью почвы теряют от 0 до 22 т/км²·год вещества в обломочной форме.

В лесостепных условиях в зимнее время осязаемое развитие приобретают эоловые процессы, когда с обнаженных и малоэрозивных участков сдувается мелкозем.

Для действия описываемого экзодинамического комплекса характерно широкое развитие солифлюкционных и дефлюкционных процессов. По наблюдениям А. П. Дедкова и его сотрудников, в лесостепной зоне дефлюкция наиболее интенсивно идет на залесенных склонах, где она имеет скорость в 1,1—1,3 раза выше, чем на безлесных. В пределах последних на глубинах 25—46 см движение почвенных масс происходит с максимальной скоростью, равной 1,2—3 мм/год. Выше тормозящее действие оказывают корни растений, а на глубинах 1—1,2 м движение затухает.

К склонам эрозионных форм приурочено действие оползневых, обвальных и осыпных процессов. Действие двух последних обусловлено увеличением роли физического выветривания.

Отрицательный баланс обломочного материала на днищах долин определяет преобладание эрозии над аккумуляцией в их пределах. Присутствие грубообломочного материала в речных наносах делает эрозионную работу рек весьма эффективной. Поэтому в умеренном поясе зональные речные долины быстро углубляются и переходят в перстративную фазу. Там же, где их разработка задерживается из-за наличия аномально прочных, трудно размываемых пород, долины в основном развиваются по инстративному типу. Аллювиальные накопления в долинах сочетают в своем составе грубообломочные русловые и мелкоземистые пойменные и старичные фации.

На молодых аккумулятивных равнинах умеренного пояса встречаются озера и болота, в которых осуществляется аккумуляция илов и торфяников. Так, по данным Л. В. Яковлевой, в небольших озерах северо-запада СССР седиментация обычно происходит со скоростью порядка $10 \text{ г/м}^2\cdot\text{год}$, а максимальные ее значения приближаются к $100 \text{ г/м}^2\cdot\text{год}$. При этом значительную долю осадка, иногда более 50 %, составляет органическое вещество в основном автохтонного происхождения. Поэтому плотность сухого осадка обычно мала ($0,05\text{--}0,2 \text{ г/см}^3$) и скорость заполнения таким материалом озер выражается цифрами от долей до одного, редко двух миллиметров в год.

Значительная интенсивность биогенных и биогенно-элювиальных процессов, действующих в рассматриваемых условиях, обеспечивает преобладание в минеральном стоке рек растворенных веществ над обломочным материалом. По данным А. П. Дедкова и соавторов [14], средний модуль ионного стока равнинных рек в лесной и лесостепной зонах умеренного пояса достигает соответственно 27 и 28 $\text{т/км}^2\cdot\text{год}$. В то же время понижение поверхности за счет механического сноса в лесной зоне европейской части СССР, согласно К. Н. Лисициной, составляет 0,005 мм/год, что соответствует среднему модулю стока взвешенных наносов в 10 $\text{т/км}^2\cdot\text{год}$. По другим данным [14], средние модули стока взвешенных наносов мелких таежных речек составляют 4,6, а крупных 7,8 $\text{т/км}^2\cdot\text{год}$.

Оценивая в целом функционирование водосборных ПЭК в условиях умеренного пояса, можно отметить, что в принципе оно идентично их развитию в тропиках и субтропиках. В обоих случаях отрицательный баланс вещества на дне долин способствует их ускоренному врезанию по сравнению со снижением междуречий. Однако, если в жарком поясе почти повсеместно развитый поверхностный элювиальный чехол представляет собой геологическое тело мощностью до нескольких десятков метров, то в умеренном его мощность на порядок меньше. Меньшая интенсивность биохимического выветривания в умеренном поясе

делает возможным достаточно широкий перенос грубообломочного материала.

Равнинные ПЭК планации

Комплексы планации функционируют на территориях со значительным дефицитом влаги или тепла, включая и районы их совместного недостатка. Такие территории представляют собой пустыни (кроме их экваториальных частей) и полупустыни в жарком и умеренном поясах, тундры и арктические пустыни в холодном. Таким образом, для этого типа водосборных ПЭК характерно деление на две резко отличные группы — пустынно-полупустынную и тундрово-полярную.

Условия аридного климата. Пустынные и полупустынные территории имеют радиационный баланс от 250 (Сахара) до 80—125 кДж/см²·год (пустыни Центральной Азии) и характеризуются большим дефицитом влаги (коэффициент увлажнения от 0 до 30).

В полупустынях без учета эфемеров покрытие почвы растительностью иногда достигает 50 %. В пустынях оно значительно меньше, поскольку в них преобладают не столько растительные ассоциации, сколько удаленные друг от друга отдельные экземпляры растений с глубокой корневой системой [30]. Фитомасса в пустынях и полупустынях достигает всего 1,5—4,5 т/га [29], чистая первичная продукция 2—4 т/га·год [30]. В биологическом круговороте в пустынях участвует повышенное число зольных элементов вследствие того, что многие растения здесь приспособились к произрастанию на засоленных почвах. Тем самым растительность как бы способствует выносу солей на поверхность, откуда они могут удаляться или рассеиваться ветром. Преобладающее в пустынях и полупустынях физическое выветривание осуществляется в большинстве своем в форме термического разрушения горных пород. Возникающий при этом грубообломочный материал оказывается, как правило, не таким крупным, как в тундрово-полярных областях. Широкое распространение приобретают маломощные щебеночные покровы, свойственные аридным плато и массивам. В местах развития псаммитовых пород и гранитов выветривание приводит к формированию песчаного материала. Глинистое вещество, возникающее в большей мере в полупустынях, содержит в своем составе как гидрослюды, так и монтмориллонит. На скальных поверхностях часто формируются корочки пустынного загара, представляющие собой выпоты растворимого материала, вынесенного влагой из внутренних участков горных пород.

Местами в пределах пустынных и полупустынных областей происходит интенсивное поступление солей в почвогрунты из водоносных горизонтов. Так, согласно Н. Ф. Глазовскому, в ни-

зовьях рек Терека и Кумы подземные воды ежегодно выносят соли в количестве от долей до 22 т/км². Межгорные впадины Казахстана получают из этого же источника от долей до 20 т км²-год и более солей.

Восходящее движение минерализованных вод к поверхности почвогрунтов и их последующее испарение приводят к возникновению специфических аккумулятивных образований, которые рассматриваются в качестве специфических аридных кор. Последние по составу делятся Б. М. Михайловым на гипсовые (гипсовые глины, гажга), карбонатные (каliche, калькрет, кавернозные известняки) и кремнистые (сливные кремнистые песчаники, кавернозные кремнистые породы, сількрет). Мощность этих образований от нескольких до десятков, а иногда и до сотен метров.

Большую роль в полупустынях и особенно в пустынях выполняет ветер. Он корродирует выступы и развалы скальных пород и осуществляет дефляционную работу в местах развития рыхлых почвогрунтов. Однако наличие даже скудной полупустынной и пустынной растительности, а также ненарушенного почвенного покрова сильно снижает эффект действия ветра.

В каменистых пустынях и полупустынях ветер «продувает» маломощные глыбово-щебенистые покровы, облегающие возвышенные элементы рельефа. В меньшей степени эта работа выполняется подповерхностным смывом. Остаточные скелетные массы медленно смещаются под уклон в результате температурного и криогенного крипа. Последний имеет место лишь в областях с отчетливо выраженной холодной зимой.

Редкие ливни, выпадающие в пустынных и полупустынных областях, производят колоссальную работу по транспортировке существенно мелкоземистого материала по склонам и рыхлых масс различного гранулометрического состава по днищам долин.

По наблюдениям А. Киркби и М. Киркби в Южной Аризоне (США) во время ливней (до возникновения сплошного поверхностного стока) удары капель при разбрызгивании переносят частицы до 5 мм на расстояние до 15 см. При образовании слоя воды толщиной более 5 мм ударное действие прекращается и размыв склонов осуществляется лишь по отдельным зачаточным эрозионным рывинам и бороздам. Даже разреженная растительность защищает склоны от размыва. Скорость снижения склонов под воздействием делювиального сноса в данном случае составляла около 0,1 мм/год.

Линейное перемещение вещества осуществляется главным образом временными водотоками. Последние функционируют в оврагах и объединяющих их долинах, причем некоторые пересыхающие реки имеют очень значительную протяженность (р. Уил в Западном Казахстане более 200 км, а р. Сагиз около 150 км). Временные водотоки обычно возникают в периоды ливней, от

которых зависит также и питание некоторых из них грунтовыми водами. Дно долин временных водотоков обычно заполнено материалом, оставленным ранее действовавшими потоками. Сбрасывая в долины новые порции обломочного материала и увлекая старые, потоки перегружаются наносами, вследствие чего их эродирующая сила оказывается небольшой. Лишь в отдельных местах они эродируют днища долин и значительно чаще их борта. В целом долинная сеть в аридных районах, по мнению многих исследователей, является унаследованной от более влажных эпох, во время которых и происходило ее формирование.

Л. Лесопольд и его сотрудники привели дифференцированный учет сноса и аккумуляции обломочного материала в травянисто-кустарниковой полупустыне штата Нью-Мексико (США) на участке, находящемся в пределах холмистой депрессии левобережья р. Рио-Гранде. Участок сложен рыхлыми накоплениями. Они установили, что в его пределах механический снос осуществляется со скоростью $4800 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$, причем делювиальным смывом удаляется $97,9 \%$ обломочного материала за счет прироста верховьев оврагов $1,4 \%$ и медленного массового движения обломков $0,7 \%$. Избыточная аккумуляция в многочисленных руслах временных водотоков равняется $1,6 \text{ см/год}$, или $504 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$.

С действием временных потоков тесно связана деятельность пересыхающих озер, которые периодически возникают в замкнутых понижениях рельефа. В озерах накапливаются самые различные по составу осадки — от грубообломочных до эвапоритовых.

Итак, для водосборных ПЭК пустынь и полупустынь характерны следующие особенности: 1) значительная или очень сильная подавленность биологических процессов; 2) преобладание главным образом температурного выветривания над остальными видами дезинтеграции горных пород и формирование преимущественно щебеночно-дресвяно-песчаного материала; 3) наличие аккумулятивных солевых кор и присутствие солей в образованиях различных генетических типов; 4) неустойчивый пульсирующий характер массового движения вещества к базисам денудации при избыточном накоплении его в долинах и котловинах; 5) большая роль ветра в мобилизации и перемещении обломочного материала.

Условия холодного климата. В тундрово-полярных областях, характеризующихся низкой теплообеспеченностью (радиационный баланс тундры $40\text{—}85$, арктической пустыни $15\text{—}40 \text{ кДж/см}^2 \cdot \text{год}$), развитие биогенных процессов также оказывается весьма незначительным. Количество биомассы, приходящееся на единицу площади тундрово-полярных областей, оценивается в $10\text{—}17 \text{ т/га}$, [29, 30], а продуктивность в $1,4\text{—}2 \text{ т/га} \cdot \text{год}$. Низкая активность процессов деструкции мертвого органи-

ческого вещества обуславливает наличие здесь больших запасов подстилки, оцениваемых в 60 т/га [29].

Большую часть года в тундрово-полярных областях устойчиво держатся отрицательные температуры, что снижает интенсивность господствующего здесь морозного выветривания. Однако в наиболее теплые два-три летних месяца число температурных переходов через 0°C на поверхности земли достигает многих десятков раз. Например, на Северной Земле, как указывает А. Г. Чигир, оно равняется 70—80.

Благодаря почти повсеместному присутствию воды в таких грунтах эти температурные колебания приводят к энергичному разрушению горных пород, в результате чего формируется грубообломочный и мелкозернистый материал. Особенно интенсивно разрушение горных пород идет в нивальных нишах. Опытами установлено, что присутствие воды в 160 раз ускоряет генерацию мелких частиц, среди которых закономерно преобладание пылеватой фракции, представляющей собой конечный продукт криогенной дезинтеграции двух главных породообразующих минералов обломочных осадочных пород — кварца и полевого шпата.

Глинистое вещество формируется в тундрово-полярных условиях в подчиненном количестве. В его составе преобладают гидрослюды. Накопление глинистого материала тормозится к тому же его криогенной коагуляцией, ведущей к образованию агрегированных пылеватых частиц.

Важным фактором механического разрушения горных пород является ветер, действующий круглогодично. В тундрово-полярных областях сильные и ураганные ветры особенно часты в зимнее время. Их скорость достигает 15—30 м/с, а отдельные порывы — 60 м/с. Такие ветры перераспределяют снеговой покров, удаляя его с возвышений, и способны поднимать в воздух и переносить не только мелкозем, но также древесину и щебень. Эоловые частицы коррадируют выступы горных пород, шлифуют оголенные скальные площадки. Уносимый ветром материал частично оседает на суше, главным образом в понижениях рельефа, где он либо включается в состав движущегося под уклон грубообломочно-мелкоземистого покрова, либо попадает в сферу деятельности текучих вод. Некоторая его часть попадает в болота и озера и лишь незначительная доля может формировать эоловые накопления, приуроченные главным образом к днищам крупных долин или котловин. О значительности масштабов дефляции свидетельствуют наблюдения С. М. Мягкова в антарктическом оазисе Мак-Мердо. Здесь за год развевание сухого грунта на отдельных участках может приводить к общему снижению их поверхности на 1,5 см/год. В то же время сведения об общем выносе эоловых частиц из тундрово-полярных районов в океан противоречивы. Согласно Н. А. Белову, эоловая поставка материала в район Сибирского шельфа составляет едва ли не 60 % цифры, которой оценивается посту-

пление на него взвешенных веществ с речным стоком. По другим данным средний модуль аккумуляции эоловой пыли на паковых льдах к северу от Аляски в полосе шириной 500 км равняется всего $0,033 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$.

В тундрово-полярных условиях интенсивно проявляются повсеместно происходящие гидротермические движения, под которыми Б. С. Русановым понимаются объемные изменения рыхлых грунтов, связанные с фазовыми переходами и перераспределением содержащейся в них влаги. Амплитуда гидротермических движений колеблется от 70—80 до 300—400 мм. В низовьях Енисея, например, величина площадного пучения, по данным С. А. Замолотчиковой, равна 2—3 см/м на крутых склонах и 6—17 см/м на пологих. Примерно такими же цифрами характеризуется и их осадка. Суглинистые грунты при прочих равных условиях вспучиваются в 3—4 раза сильнее песчаных.

С гидротермическими движениями связаны морозная сортировка грунтов и в определенной степени криогенный крип (дезерпция) и солифлюкция. Последние два процесса играют главную роль в массовом перемещении покрова обломочного материала. Такой покров развит почти повсеместно, обычно имеет мощность от одного до нескольких метров, иногда до первых десятков метров. Он прерывается лишь на обрывах, отдельных выступах скального субстрата и зонах флювиальной и озерной деятельности. Массовое движение обломочного материала происходит уже при уклонах в $0,5—1^\circ$.

В местах развития грубообломочных скелетов грунтов проявляется криогенный крип, механизм которого детально описан В. Г. Чигиром. Подчиненную роль в их перемещении играет температурный крип. Скорость движения скелетных грунтов зависит от масштабов их кольматации льдом, количества переходов температуры через 0°C в году, крутизны поверхности. В высоких широтах наиболее активное движение грубых обломков (сантиметры в год, иногда более) наблюдается на крутых ($20—25^\circ$) южных склонах. Как показывают наблюдения В. С. Савельева, Л. А. Жигарева, Т. Н. Каплиной и др., покровные отложения, содержащие 30—40 % (объемн.) или более мелкозернистого существенно дисперсного материала, подвергаются солифлюкции. Движение деятельного слоя в этом случае происходит неравномерно и с глубиной обычно затухает. Поверхностный слой смещается со скоростями от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в год, а иногда и быстрее. При быстрой солифлюкции смещения бывают кратковременными, но характеризуются скоростями от метров до нескольких десятков метров за сутки. Солифлюкция осуществляется как на оголенных, так и покрытых торфяно-растительным слоем поверхностях. В последнем случае она происходит в меньшем по мощности деятельном слое, чем на оголенных участках, поскольку торфяно-растительная покрывка ослабляет летний прогрев

грунтов. На территориях, сложенных рыхлыми слабо литифицированными или плотными породами пелитового состава, солифлюкционные процессы являются господствующей формой площадного перемещения вещества.

Значительное развитие в полярных и тундровых условиях имеют делювиальные процессы, вследствие чего делювий местами либо образует самостоятельные покровы, либо переслаивается с образованиями криогенного крипа или солифлюкции. Делювиальный смыв развивается уже при наклоне поверхности всего в полградуса. Наиболее активно он действует в местах распространения псаммитовых пород. В целом рельефообразующий эффект делювиальных процессов обычно значительно уступает действию солифлюкции и криогенного крипа.

Осыпные и обвальные процессы осуществляются на весьма ограниченных участках. Удаление грубообломочного материала при камнепадах и осыпании в зимнее время местами усиливается благодаря скольжению отдельных глыб под уклон по плотному снегу на нижележащих склонах. По наблюдениям В. А. Суходровского, скорость отступания обвально-осыпных склонов обычно невелика и не превышает сотых долей миллиметра в год.

Оползневые процессы широко развиваются на склонах долин в местах распространения рыхлых или слабо литифицированных пород.

В широких масштабах в описываемых условиях происходит включение льда в состав горных пород и его изъятие из них. В целом ряде случаев это приводит к быстрым и очень значительным изменениям состава и структуры грунтов. К таким явлениям в первую очередь следует отнести формирование полигонально-жильных льдов, бугров пучения — булгуныххов и термокарст.

В тундрово-полярных областях находится большое количество озер, причем особенно много их в тундре. Озера и сопряженные с ними болота являются здесь главными аккумуляторами органического вещества, накапливающегося в виде сапропелевых илов и торфяников.

Линейное перемещение вещества в описываемых условиях осуществляется самыми различными процессами. Зимой при наличии расчлененного рельефа это делаютдвигающиеся по лавинам лавины. В начале лета по отдельным долинам могут проходить водо-снежно-грязевые сели. Днища ложбин и мелких долин, кроме того, могут быть заняты каменными глетчерами или солифлюкционными потоками.

Реки в пределах тундрово-полярных областей не справляются с транспортировкой поступающих в их русла масс обломочного материала со склонов и частично аккумулируют его на днищах долин. В мелких долинах склоновые образования сложно перемежаются с аллювием. Долинная сеть находится здесь почти повсеместно в констративной фазе.

Будучи перегружены наносами, реки дробятся на рукава. Извилистость русел снижает уклоны движения водных потоков, что способствует аллювиальной аккумуляции. Формирующиеся в таких условиях речные отложения повышенной мощности в принципе идентичны по динамике образования плейстоценовому перигляциальному аллювию. Такому аллювию, помимо повышенной мощности, присущи резкое преобладание русловых фаций над пойменными и старичными, наличие реликтовых криогенных тектур и структур, во многих случаях залегание на подстилающих образованиях без значительного размыва, четкая парагенетическая связь с перигляциальными склоновыми образованиями. В небольших долинах, выработанных в скальных породах, перигляциальный аллювий имеет преимущественно грубообломочный состав. В областях развития слабо литифицированных пород он представлен главным образом алеврито-песчаными накоплениями.

В связи с полным промерзанием мелких рек в зимнее время и прекращением притока вод со склонов деятельность речных систем зимой резко ослабевает. Поэтому основная масса материала выносится с речным стоком лишь в течение короткого теплого периода.

Как показали исследования Н. Н. Романовского, специфическую работу по промывке аллювия от мелкоземистого материала выполняют в речных долинах наледи.

Согласно А. П. Дедкову и др. [14], средние модули стока взвешенных наносов мелких и крупных тундровых рек соответственно равняются 19 и 6,3 т/км²·год. Средний модуль ионного стока, определенный без разделения рек по крупности, составляет 7 т/км²·год.

Скорость экзодинамического снижения тундрово-полярных территорий, определенная по модулям минерального стока рек, оказывается незначительной. Согласно Ж. Корбелю, она равняется для равнин холодного пояса всего 0,018 мм/год. Однако данная цифра получена без учета потерь подземного льда, входящего в значительных количествах в состав верхней части земной коры многих районов криолитозоны.

На основании изложенных сведений характерными особенностями водосборных ПЭК тундрово-полярных областей можно считать: 1) резкое преобладание прямого физического, главным образом криогенного воздействия на земную кору над биогенным; 2) образование грубообломочно-мелкоземистых поверхностных отложений и закономерно присутствующих в парагенезе с ними биогенных торфяников и сапропелей; 3) усиленное функционирование всей системы экзодинамических процессов в короткий летний и переходный периоды и остановка действия многих ее звеньев зимой; 4) избыточное накопление обломочного материала у местных базисов денудации и особенно на днищах долин (положительный баланс вещества на них), что делает

практически невозможно сколько-нибудь устойчивое эрозионное врезание в таких условиях; 5) закономерное присутствие подземного льда, в основном в составе существенно дисперсных пород поверхностного чехла, в количестве иногда до 70—90 % от всей массы.

Равнинные ПЭК планации и врезания

Такие водосборные ПЭК характерны для территорий с сухим жарким и умеренным климатом, а также для областей с резко континентальным (бореальным) климатом.

Условия ПЭК семиаридного жаркого климата. В жарком поясе условия для агградации верхних звеньев гидрографической сети несомненно существуют в промежуточной зоне, разделяющей сухие листопадные леса и типичные полупустыни. Растительность таких зон представлена редколесьями, кустарниками и низкотравьем. Такие территории получают от 250 до 600 мм осадков в год. Сезон дождей длится здесь 3—5 месяцев. Дефицит влаги ведет к значительному подавлению биогенных процессов, ослаблению биохимического выветривания и усилению физического. Покровный чехол, возникающий в таких условиях на плотных породах, представляет собой щелнистые супеси или суглинки с включением карбонатов. В местах разгрузки подземных вод под почвой формируются аккумулятивные карбонатные тела, которые рассматриваются как специфические коры выветривания, получившие название каличе и калькрет. Они имеют мощность от первых до десятков метров и при удалении с их поверхности рыхлого покрова образуют плотный панцирь наподобие бетонного покрытия. Согласно В. В. Добровольскому, такой панцирь может перекрывать самые различные по происхождению и составу горные породы.

Территории с семиаридным жарким климатом представляют собой области широкого развития делювиальных процессов и формирования обширных шлейфов подножья в основании склонов. В длинный засушливый период (7 месяцев и более) суглинистые и глинистые почвы здесь растрескиваются, а в период дождей набухают. Лучше впитывают влагу песчаные почвы. Согласно наблюдениям в Кении в условиях кустарниково-травянистой саванны с осадками в 500—600 мм, длинные (0,5—2 км) пологие ($\sim 3^\circ$) склоны при незначительной пастбищной нагрузке, которой можно пренебречь, разрушаются преимущественно делювиальным смывом. По данным Т. Данне и соавторов, современная скорость снижения поверхности различных водосборов колеблется при этом от 50 до 140 т/км²·год.

Деятельность делювиальных процессов дополняется широким развитием осыпных и обвальных процессов на крутых склонах.

В целом для водосборных ПЭК семиаридного жаркого климата характерны: 1) пониженная активность биогенно-элювиальных процессов и достаточно высокая — физического выветривания; 2) очень широкое развитие делювиального смыва; 3) пульсирующий характер движения вещества с речным стоком, по-видимому, при неполном выносе обломочного материала из мелких долин.

Условия умеренного семиаридного климата. Степные территории находятся в континентальных секторах суши и характеризуются жарким летом и холодной зимой. Радиационный баланс степей равняется $125\text{—}190$ кДж/см²·год, годовые суммы осадков ($200\text{—}450$ мм) в 2—3 раза меньше годовой испаряемости.

Продуктивность степной растительности в среднем составляет 8—9 т/га·год, что свидетельствует о большом энергетическом потенциале происходящих в степях биогенно-элювиальных процессах. Однако отсутствие промывного режима сдерживает их развитие вглубь и создает предпосылки для аккумуляции больших количеств органического вещества в почве. Поэтому ненарушенные степные почвы характеризуются самыми высокими запасами гумуса, достигающими, по М. М. Кононовой, в верхнем метровом слое черноземов в среднем 500 т/га. Высокое плодородие степных почв, обеспечиваемое, в частности, их очень значительной водоудерживающей способностью, является причиной развития плотного покрова травянистой растительности. Поэтому, несмотря на подверженность земной поверхности в пределах степей резким температурным колебаниям и изменениям влажности, интенсивным ветрам, ливневым осадкам, все эти воздействия в значительной мере блокируются чрезвычайно устойчивой системой почва—растительность. Зато степи оказываются поставщиками значительных количеств растительного детрита, транспортируемого, например, в виде громадных количеств травы перекати-поле.

Физическое выветривание в степных условиях приводит к образованию щебнисто-дресвяно-мелкоземистых накоплений всюду, где скальные породы находятся у поверхности или в непосредственной близости от нее. Среди глинистых минералов, формирующихся в степях под воздействием биохимического выветривания, преобладают гидрослюда и монтмориллонит.

Перемещение вещества с междуречий на днища долин осуществляется делювиальным смывом, интенсивность которого однако не так велика, как в смежных полупустынных районах. Судя по данным Х. Беннета [2], снижение склонов под воздействием этого процесса может достигать 20 т/км²·год. Однако согласно другим источникам [6], наличие хорошо развитой степной растительности практически полностью блокирует делювиальные процессы.

Другими способами движения вещества к местным базисам денудации в степях являются дефлюкция и солифлюкция,

а также локально развитые оползневые, обвальные и осыпные процессы. С обнаженных участков, особенно в зимнее время, некоторая часть материала удаляется ветром.

Средние модули твердого и ионного стоков степных рек в естественных условиях приблизительно одинаковы и равняются $10 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$ каждый [14].

Зональная долинная сеть в степях развита намного хуже, чем в лесостепных и лесных районах.

Хотя изученность водосборных ПЭК степных районов в целом остается недостаточной, можно констатировать, что им свой-

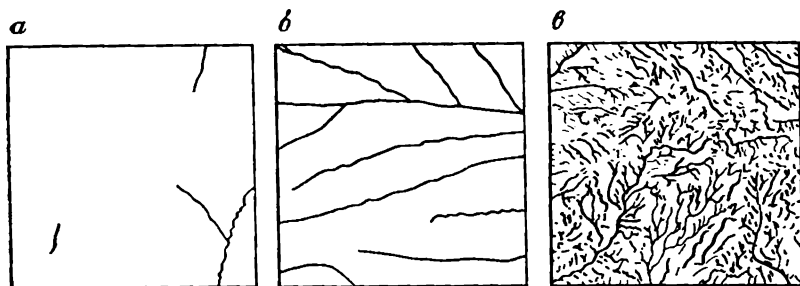


Рис. 1. Различие в густоте гидросети трех водосборных площадей, расположенных в областях:

а — аридного (юго-восток штата Невада); *б* — семиаридного (запад штата Канзас) и *в* — гумидного (восток штата Индиана) климата (Вишер, 1954 г.)

ственно почти такое же экодинамическое развитие, как и ПЭК прилежащих территорий с умеренным семигумидным и гумидным климатом. Однако маловодность степных рек и слабая развитость долинной сети свидетельствуют о том, что последняя по характеру развития занимает промежуточное положение между врезающимися долинами семигумидно-гумидных районов и агрессирующими — аридных (рис. 1).

Условия бореального климата. Области распространения водосборных ПЭК планации и врезания являются огромные территории, находящиеся в условиях резко континентального бореального климата и характеризующиеся сплошным и островным распространением многолетнемерзлых пород. В их пределах развита лесотундровая, таежная, лесостепная и степная растительность. Этим территориям свойственно сильное сезонное промерзание и очень медленное (в течение одного-двух летних месяцев части лета) оттаивание грунтов. В местах отсутствия многолетнемерзлых пород эти процессы распространяются до глубин 3—4 м. Поэтому на площадях с резко континентальным бореальным климатом значительная часть осадков скапливается в деятельном слое и переувлажняет его, вызывая активизацию склонового сноса. Такая активизация является реакцией на соз-

даваемую климатическим фактором затрудненность или почти полную невозможность поступления плакорных внутрипочвенных вод в более глубокие части земной коры, что является показателем недостаточной трансформированности ПЭК живым веществом в условиях экстремально холодных зимних периодов. Поэтому в бореальных областях значительное, а подчас и весьма интенсивное развитие имеют процессы физического выветривания. Так, на юге Средне-Сибирского плоскогорья под пологом таежной растительности биохимическая кора выветривания оказывается как бы наложена на достаточно мощный физический элювий. Такой элювий, сформировавшийся на алевролитах ордовика, описан в районе г. Братска (Приангарье) Ю. Д. Матвеевым. Снизу вверх он представлен пятиметровым слоем трещиноватых алевролитов, постепенно переходящим в мстровый слой глыб до 30 см в поперечнике; еще выше залегают щебень и глыбы размером до 15—20 см с гнездами дресвы (мощность 1 м), и венчает разрез двухметровый слой щебенисто-дресвяно-суглинистого состава, в котором верху количество грубообломочного материала быстро убывает. Большая мощность этого сложно построенного биогенно-морозно-элювиального профиля связана с тем, что глубина годовых колебаний температур доходит до 9 м. Немаловажным обстоятельством является то, что сверху физический элювий перерабатывается биохимическим выветриванием и при замедленном сносе продуктов дезинтеграции, происходящим в природных условиях, со склонов на днища долин поступает в большинстве своем мелкоземистый материал. Однако это происходит не всюду, и в местах развития прочных кристаллических пород на склонах, а иногда и на вершинах формируются курумы. По наблюдениям В. А. Войлошникова в Приангарье глыбы в осевой части каменных потоков двигаются со скоростью 1—2 см/год.

Обваливание и осыпание в Средней Сибири развиты локально и обычно приурочиваются к склонам крутизной в 40—45° и более. Делювиальный смыв фиксируется только в степных и лесостепных условиях.

В целом в условиях южной и средней тайги резко преобладает вынос вещества в растворенной форме над его удалением в обломочной форме с речным стоком. Модули ионного стока рек варьируют от 10 до 40 т/км²·год, тогда как модули твердого стока колеблются от <5 до 5—20 т/км²·год. Поэтому крупные и средние речные долины здесь активно углубляются реками, а на податливых к размыву участках находятся в перстративной фазе. В то же время вершины долинной сети оказываются в избытке заполнены современными наносами и даже слившимися шлейфами подножия, состоящими из курумов или солифлюкционных суглинков. По мере продвижения на север порядок долин, подвергающихся неаллювиальной и аллювиальной агградациям, возрастает. Особенно резко это ощущается в об-

ласти так называемого тундролесья, где большую роль приобретают процессы озерной седиментации.

Современная агградация верхних звеньев долинной сети на больших площадях с различными ландшафтами свидетельствует о том, что свойственные им ПЭК в целом в прошлом были значительно трансформированы биогенным фактором, чем ныне. Это обеспечило создание эрозионных врезов там, где сейчас происходит их агградация.

Горные ПЭК планации

Условия холодного климата. В горах, согласно Ж. Корбелю, экзодинамический снос на порядок интенсивнее, чем на равнинах. Огромные уклоны днищ долин, достигающие первых градусов, как будто бы должны обеспечивать повсеместную глубинную интенсивную эрозию рек. Однако и в горах при определенных условиях планация может преобладать над расчленением.

Избыток продуктов механического сноса в горных долинах создается в верхнем гляциально-нивальном поясе гор и отчасти в примыкающем к нему ниже субнивальном поясе. Гляциально-нивальные и субнивальные области, занимающие самое высокое положение в горах, как и тундрово-полярные, служат ареной господства физического, в первую очередь морозного выветривания. В этом ярусе гор дезинтеграция пород обычно идет так быстро, как нигде на суше.

Отрицательные температуры, доминирующие в гляциально-нивальном поясе, препятствуют развитию здесь высшей растительности. Тем не менее, как показала М. А. Глазовская, и в этих условиях имеют место биогенные, а следовательно, и биогенно-элювиальные процессы, связанные с жизнедеятельностью микроорганизмов.

Колонии микроорганизмов селятся на скальных участках благодаря наличию в них микротрещин, причем образование последних в основном, по-видимому, обусловлено расклинивающим действием тончайших водных пленок. Однако в дальнейшем лишайники проникают в глубь горной породы на 1—2 мм, усиливая ее разрушение. Изучая нивальный мелкозем, М. А. Глазовская показала, что в трещинах скал так называемый «первичный мелкозем» представляет собой продукты минерализации тел лишайников. Ею же были исследованы тонкие биогенно-элювиальные корочки на гранитах. В этих образованиях по сравнению с невыветрелой породой несколько снижается содержание полевых шпатов, биотита и роговых обманок. Зато в них присутствует кальцит, вторичные глинистые минералы и бурые изотропные агрегаты. Во всех выветрелых корках найден в небольшом количестве опал.

Биогенно-элювиальные корочки часто содержат зеленые и красновато-бурые пятна и налеты, образованные колониями

зеленых водорослей *Chlorococcum* и *Chlorella*, одноклеточными сине-зелеными водорослями *Stroosocum* и нитчатыми сине-зелеными водорослями. Кроме этих организмов присутствуют диатомовые водоросли, бактерии и грибы.

Возникновение ряда минеральных новообразований, обнаруженных в изученных корочках, обусловлено жизнедеятельностью микроорганизмов. Исследования М. А. Глазвской показывают, что скопления кальцита в корках выветривания часто находятся в совокупности с колониями зеленых и сине-зеленых водорослей, которые способствуют выделению из растворов углекислого кальцита. Аморфный кремнезем (опал) присутствует в виде скелетов диатомовых водорослей родов *Pinnularia*, *Eupotia*, *Navicula*, *Meridion* и др. Некоторые зеленые водоросли аккумулируют в своих телах железо и марганец и способствуют образованию железо-марганцевых корок «высокогорного загара» [42].

В субнивальном поясе находятся участки, которые, помимо лишайников, бывают покрыты мхом и редкими мелкими кустарниками. Биогенные и биогенно-элювиальные процессы здесь уже не так подавлены, как в гляциально-нивальном поясе, однако процессы физической денудации все еще очень сильны.

Определение скорости физического выветривания, проведенное Ю. Б. Тржцинским с соавторами в тундрово-гольцовом поясе Хамар-Дабана, Байкальского и Тункинского хребтов, дало следующие результаты. Оказалось, что обнажения мелкозернистых гранитов в результате такого выветривания отстают в среднем со скоростью 2, крупнозернистых гранитов 4—5, гнейсов 6, кристаллических сланцев 6—10, мраморов 7, аргиллитов 12—16 и известняков 21 мм/год.

В гляциально-нивальном и особенно субнивальном поясах в незначительном количестве формируется глинистое вещество преимущественно гидрослюдистого состава [42].

Интенсивность экзодинамических процессов в верхнем ярусе гор варьирует в зависимости от количества осадков и режима температур. В пределах слабо увлажненных горных массивов (количество осадков 50—350 мм) формирование пылевато-щебнисто-глыбового материала сочетается с его массовым и дифференцированным выносом [42]. Мерзлотная сортировка материала приводит к формированию «структурных морозных грунтов».

Грубообломочный материал часто с примесью мелкозема в виде маломощного покрова облекает водораздельные поверхности и большую часть склонов. Вместе с тем в этом поясе гор имеются и оголенные поверхности, обычно представляющие собой выступы водораздельных гребней, скальные обнажения и выступы на склонах.

Мелкозем в значительном количестве удаляется ветром и водотоками, изредка возникающими на склонах и небольших

ложбинах. Сильные ветры перемещают, кроме того, отдельную дресву и мелкий щебень. Но главными способами движения грубообломочного материала являются камнепады и криогенный крип. Последний обуславливает смещение как линейных каменных глетчеров, так и плащеобразно залегающих курумных покровов. Движение осыпей является менее интенсивным агентом денудации, так же как и развитая в описываемом поясе солифлюкция.

В условиях значительного увлажнения (500—1000 мм и более) в гляциально-нивальном поясе формируются ледники и многочисленные снежники. Обилие влаги интенсифицирует выветривание и снос.

Пылевато-щебнисто-глыбовый материал, помимо обваливания, осыпания, медленного массового движения, а также частичного выноса мелкозема водой и ветром сбрасывается со снежными лавинами. При этом роль снежных лавин в денудации в указанных условиях оказывается очень велика. Например, в Канадских скалистых горах снежные лавины являются главным агентом переноса обломочного материала на крутых склонах выше верхней границы леса. Среднегодовая скорость его накопления внутри лавинных лотков, по наблюдениям Б. Лакмена, колеблется от 0,7 до 5 мм/год. В то же время лавины производят определенную работу по углублению и расширению ложбин, по которым они перемещаются.

В гляциально-нивальном поясе гор зарождаются специфические гляциальные сели. Каждый такой сель представляет собой стремительно движущуюся водно-снежно-ледовую массу, вместе с которой перемещается и большое количество грезекаменного материала. Гляциальные сели возникают при прорывах воды либо из озер, подпруженных ледниками, либо из внутриледниковых водоемов, либо из моренных озер. Прорывы воды вызываются как внешними причинами (интенсивное снеготаяние, дожди и др.), так и действием внутренних сил (извержения, землетрясения).

Важнейшую роль в денудации гляциально-нивальном поясе гор играют ледники, наличие которых, как правило, является свидетельством интенсивной работы всего сочетания экзодинамических процессов. Так, М. В. Петкевич указывает, что в долине Актру (Центральный Алтай) скорость отступления склонов, разрушаемых камнепадами, обвалами и лавинами, равняется 7—8 мм/год. Согласно Ж. Корбелю, для районов современного наступания горных ледников денудационный срез оценивается огромными цифрами — 10—50 мм/год, а для районов их стабильного положения или отступления — 2 мм/год.

Получающие ледниковое питание реки оказываются настолько мутными, что, несмотря на большое падение их днищ долин, в пределах наиболее пологих участков последних накапливается констративный горный аллювий. Количество влекомых

наносов в таких реках может достигать 25—30 % от общего твердого стока. Химическая денудация в пределах нивально-гляциального пояса, по-видимому, также существенно колеблется в зависимости от условий увлажнения. Однако во всех случаях она, вероятно, несколько уступает по своим масштабам механической.

Заканчивая рассмотрение специфики экзодинамического преобразования гор в гляциально-нивальном и субнивальном поясах, можно констатировать, что здесь, как и в тундрово-полярных областях равнин, господствует малоэнергоёмкое физическое выветривание. Последнее осуществляется весьма интенсивно благодаря контрастности температурных условий и значительной влагообеспеченности большей части грунтов. Глубокое вертикальное расчленение рельефа и крутизна склонов обуславливают наряду с медленным массовым перемещением материала широкое развитие таких быстродействующих процессов, как камнепады, лавины и гляциальные сели. Как это не парадоксально, но из-за положительного баланса обломочного материала на днищах долин затруднено их врезание, что, правда, установлено лишь для долин рек, имеющих ледниковое питание. Так, согласно М. И. Ивероновой [12], долины верхнего безлесного яруса хребта Терской-Алатау Северного Тянь-Шаня, по-видимому, характеризуются положительным балансом обломочного материала. Об этом свидетельствуют результаты оценки интенсивности экзодинамических процессов в бассейне р. Чон-Кызылсу (табл. 4).

Таблица 4

Ежегодный снос продуктов выветривания на горных склонах
в бассейне р. Чон-Кызылсу [12]

Процессы	Площади их действия, км ²	Объемы перемещаемых продуктов выветривания, м ³ /год	Средняя абсолютная интенсивность процесса, мм/год
Камнепады	53	9 010	0,170
Делювиальный снос *	37	7 030	0,190
Камнепады и делювиальный снос	42	7 560	0,180
Движение осыпей	18	810	0,045
Дефлюкция **	15	15	0,001
Солифлюкция	17	2 992	0,176
Ледниковая транспортировка	4	5 112	1,278
Снежные обвалы	170	10 540	0,062
Селевые потоки	66	19 008	0,288

* Совместное действие делювиального смыва, солифлюкцин и дефлюкцин.

** Моделирует залесенные склоны, развитые в нижней части бассейна.

М. И. Иверонова пришла к выводу, что экзодинамические процессы, транспортирующие продукты выветривания, по совершаемой работе располагаются в такой последовательности: селевые потоки > снежные обвалы (лавины) > камнепады > делювиальный снос > ледниковая транспортировка > солифлюкция > движение осыпей > дефлюкция. При этом оказывается, что вынос продуктов денудации р. Чон-Кызылсу составляет примерно треть часть всей их массы, доставляемой к различным местным базисам денудации (конусы выноса, шлейфы подножия и др.). Тот факт, что массовый снос обломочного материала по склонам и мелким ложбинам в этих условиях значительно превышает его вынос по днищам долин в нижеследующий ландшафтный пояс позволяет сделать три важных вывода. Во-первых, определение скорости механической денудации гляциально-нивального пояса гор по показателям твердого стока рек может быть занижено в несколько раз. Во-вторых, учитывая, что растворенные минеральные вещества и так выносятся с речным стоком из верхнего безлесного яруса гор обычно в меньших количествах, чем твердые, а последние представляют собой лишь часть продуктов механической денудации, значительное преобладание этого способа снижения гор над химической денудацией в указанных условиях очевидно. В-третьих, несомненно, что некоторая, вероятно, небольшая часть продуктов денудации транспортируется вниз, минуя верхнюю границу леса, воздушным путем и прямо по склонам. Однако оба этих вида транспортировки и их эффективность почти совсем не изучены.

Условия аридного климата. Пустынные и полупустынные горные территории, по-видимому, интенсивнее разрушаются площадным сносом, нежели глубинной эрозией в долинах. Более того, долинная сеть, получающая питание только внутри пустынно-полупустынного яруса гор, подвергается значительной агградации, вероятно, чередующейся лишь с эпизодическими фазами врезания. Пустынные и сменяющие их выше полупустынные ландшафты обычно образуют два вертикальных пояса гор в областях с низким увлажнением. Верхний из них местами поднимается до высот в 3000—4000 м, а иногда переходит непосредственно в холодные высокогорные пустыни.

В пустынно-полупустынном поясе гор очень интенсивна селективная денудация, что свидетельствует об удалении продуктов выветривания почти одновременно с их образованием. Мелкоземисто-щебнистый, реже глыбоватый материал сносится ветром, редкими, но интенсивными ливнями, температурным, а в определенных условиях и криогенным крипом, а также осыпными и обвальными процессами.

Специфика криогенного крипа в полупустынном поясе плато Колорадо описана С. Шуммом. Он замерил скорость движения обломков на склонах различной крутизны и определил, что при наклоне в 10° они смещаются под уклон на 3—30 мм/год, при

наклоне в $20-25^\circ$ — на $10-50$ мм/год и при наклоне в $30-40^\circ$ — на $28-70$ мм/год. Размеры обломков, представленных глинистыми сланцами, варьировали от 3 до 75 мм. С. Шумм отметил, что щебнисто-дресвянистый покров вспучивался и разрыхлялся зимой, когда в нем формировались включения льда. Летом он сильно уплотнялся и смещался под воздействием редких, но сильных ливней.

Согласно Г. Ласби, интенсивность делювиального смыва с пустынных склонов плато Колорадо в районе Гранд-Джанкшен (США) выражается цифрой 1450 т/км²·год, что эквивалентно снижению склонов в $0,7$ мм/год только за счет механического выноса вещества.

В определенных условиях в аридных горах возникают грязе-каменные селевые потоки. Однако по мощности они уступают селям, формирующимся в других поясах гор.

Большую работу в аридном ярусе гор выполняют временные водотоки и реки. Последние действуют в течение всего года благодаря питанию, получаемому в более высоких частях гор. Днища долин временных водотоков всегда заполнены грубообломочным материалом. Существует мнение, что такие сухие долины в аридных районах Анд возникли в более влажных условиях.

Количественные показатели работы временных потоков в полупустынных районах плато Колорадо приводят Л. Леопольд и сотрудники. В 30 км севернее г. Галлап (штат Нью-Мексико) в стенках суходола ими описаны молодые песчано-алевритовые накопления, скорость аккумуляции которых в среднем достигала $0,6$ см/год. В самое недавнее время произошло врезание суходола, причем последнее увлажнение, когда аккумуляция сменялась глубинной эрозией, имело место в конце XIX в.

Продукты денудации, выносимые временными потоками к подножиям гор, формируют специфически построенные пролювиальные конусы выноса. В составе последних аккумулируется как обломочный, так и принесенный в растворенной форме материал. Слившиеся конусы выноса формируют аккумулятивные выполюнения межгорных впадин и наклонные равнины предгорий. Длительное разрушение гор в аридных условиях приводит к формированию мелкосопочника, а местами и почти равнинного педиплена. В обоих случаях остатки выработанного рельефа оказываются как бы в виде островов, окаймленных сухими широкими ложбинами с мощным аккумулятивным заполнением.

Горные ПЭК врезания

Наиболее активно углубление горных долин идет в ярусе, к которому приурочена лесная растительность.

Лесной ярус гор, когда он полно выражен, составляют сверху вниз сначала различного рода криволесья, затем леса из хвойных и мелколиственных пород деревьев, ниже идут более теплолюбивые листопадные, а затем и вечнозеленые леса.

Условия жаркого гумидного и семигумидного климата. Мощные биогенно-элювиальные процессы формирования глинистой коры выветривания протекают в горах под пологом влажнотропических лесов. Здесь ее чехол одевает почти все элементы рельефа, включая и крутые склоны. Х. Гарнер указывает на наличие глинистой коры выветривания на горных хребтах в районе г. Каракас (Венесуэла) до высот свыше 3000 м. При этом на самых крутых склонах она имеет мощность до 3 м, а на пологих до 12 м.

Изменения, происходящие с высотой в составе коры выветривания в горных лесах тропического пояса, установлены В. М. Фридландом [38] на примере Северного Вьетнама. Здесь от холмистых территорий к высоким горам в корках выветривания снижается концентрация железа и они делаются желтовато-белесыми. Почти полностью исчезают латериты, что связано с уменьшением в горах роли застойных грунтовых вод. В зоне туманных лесов развиты аллиты, тогда как под пологом сменяющих их ниже примерно на высотах 2000—2500 м тропических дождевых лесов господствует ферриаллитная кора выветривания.

В субтропиках под пологом вечнозеленых горных лесов широким развитием пользуется красноцветный элювий (терра-росса).

Площадное движение обломочного материала на залесенных горных склонах осуществляется в виде солифлюкции и дефлюкции. На бортах эрозионных форм интенсивны оползневые процессы. Днища долин часто расположены в выветрелых до глины материнских породах. Маломощный аллювий имеет глинисто-тонкопесчаный состав. Снижение горных стран в условиях жаркого влажного климата составляет 0,092 мм/год и является наиболее медленным для такого рода территорий. Однако, вероятно, эта цифра может быть существенно занижена из-за неучета сведений о катастрофических процессах в горах. Так, Л. Старк указывает, что сильные ливни (1000 мм за 2—3 дня), повторяющиеся 4—5 раз в столетие в сплошь залесенных районах Гималаев, приводят к очень значительному проявлению здесь солифлюкции и оползневых процессов. Годовая денудация без их учета оценивается для района Дарджилинга в 0,7—2 мм/год, а вместе с данными о катастрофических процессах течения переувлажненных грунтов — в 5 мм/год.

Развитие ПЭК в горах с постоянно влажным и сезонно влажным жарким и теплым климатом, обеспечивающим наличие хорошо развитой лесной растительности, в целом характеризуется большим сходством с их динамикой в равнинных усло-

виях. Однако меньшая мощность биохимической коры выветривания свидетельствует об ускоренном снижении рельефа, а инертивный характер аллювиальной аккумуляции — о достаточно интенсивном углублении долин, опережающем масштабы денудационного среза междуречий.

Условия умеренного гумидного и семигумидного климата. В горах умеренного пояса под пологом леса биогенно-элювиальные процессы сочетаются с физическим выветриванием, активность которого возрастает с высотой и появлением в рельефе крутых оголенных склонов, гребней и останцов скальных пород.

Хорошо развитая лесная растительность и в горных условиях почти полностью блокирует делювиальный смыв благодаря хорошей защите ею почв от ударов капель дождя и высокой инфильтрационной способности почвенного слоя. Обычно лишь незначительная часть слоя стока (от долей до первых процентов) стекает по поверхности залесенных горных склонов, тогда как основная его масса формирует внутрпочвенный и более глубокий подземный стоки.

На вершинах и склонах гор формируется относительно маломощный (от долей до первых метров) бурый или серый мелкоземистый покров обычно суглинистого состава со щебнем и дресвой в нижней части.

Площадное движение обломочного материала на лесных склонах выражается в виде дефлюкции, солифлюкции и оползания. Интенсивность этих процессов значительно варьирует. В одних случаях дефлюкционный снос может являться даже основной формой поставки обломочного материала в русла рек. Такая картина имеет место в пределах небольших водосборных бассейнов Прибрежного хребта в штате Орегон (США). Здесь длинные и крутые (20—30°) залесенные склоны сложены базальтами и перекрыты сплошным маломощным (0,8 м) чехлом дресвянистых суглинков. Медленное массовое движение последних формирует сток взвешенных наносов р. Рок-Крик. Величина его около 30 т/км²·год, а с учетом выноса вещества в растворенной форме снижение поверхности Берегового хребта в названном бассейне составляет около 75 т/км²·год, т. е. приблизительно 0,03 мм. Господство дефлюкции в составе процессов площадного механического удаления вещества в данном случае, по-видимому, объясняется высокой увлажненностью (3400 мм/год) и наличием прочных скальных базальтовых пород.

В других случаях, как, например, в хребте Терскей-Алатау (Тянь-Шань), залесенные дефлюкционные склоны оказываются чрезвычайно консервативными и их снижение составляет всего 0,001 мм/год [12]. Поэтому большую роль в питании долин обломочным материалом в подобных условиях играют обвальные, осыпные и оползневые процессы, а в самых верхах лесного яруса и обвальный снос.

Лесной ярус гор подвергается более интенсивной химической денудации, чем выше расположенный безлесный. Подобная закономерность выявлена для Западного Кавказа Н. И. Кочетовым.

Сдерживая чрезмерное развитие механической денудации, лес в то же время способствует сохранению достаточно высокой водности горных рек. Это положительно сказывается на их эрозионной и транспортирующей способностях и приводит к интенсивной глубинной эрозии в этом ярусе гор. Как указывает Г. С. Ананьев, в лесном поясе Восточных Карпат подавляющее большинство долин находится в состоянии врезания. Скорость глубинной эрозии горных рек обычно колеблется от долей до первых миллиметров в год [26]. Учитывая, что в умеренном климате на днищах даже мелких внутривосточных горных долин всегда имеется достаточное количество грубых обломков, играющих роль абразивного материала, глубинная эрозия в них, по видимому, осуществляется особенно интенсивно.

Горные ПЭК планации и врезания

Развитие ПЭК планации и врезания в горах приурочивается к ярусам, которые характеризуются переходными условиями от нивальных или аридных к гумидным.

Примером действия системы планации и врезания в горах может служить пояс редколесий, хорошо развитый в горах Сибири и Дальнего Востока. В его пределах широко распространены такие свойственные криолитозоне процессы, как солифлюкция, делювиальный смыв и намыв, движение курумов и оползание. При этом, чем мягче подстилающие горные породы, тем больше мелкозема скапливается в поверхностном слое, больше удерживается в нем влаги и сильнее проявляются вязкопластические и текучие движения на склонах. Иногда, как это наблюдается в горном обрамлении оз. Байкал, происходят крупные оползни, сплывы мощностью 0,8—2 м, смещающие значительные по площади массивы с лесной растительностью.

Верхние звенья долинной сети (долины 1-го и 2-го порядков) в таких условиях оказываются занятыми сходящими со склонов курумами или солифлюкционными шлейфами и местами оплывинами (так же, как это имеет место в сходных ландшафтных условиях на равнинах). В более крупных долинах наблюдается хорошо выраженная констративная аккумуляция аллювия. Формирование аллювия в условиях положительного баланса вещества свойственно верхним звеньям долинной сети среднегорья Восточного Забайкалья, покрытого лесной и горно-степной растительностью.

Особенности развития горных ПЭК в редколесных, лесных и лесостепных условиях криолитозоны в целом изучены недостаточно. Однако сочетание процессов агградации верхних звеньев

долинной сети с врезанием нижних звеньев здесь, по-видимому, является одной из важнейших особенностей их современного состояния.

Долинные ПЭК

Изучению наземной долинной сети, в особенности ее крупных звеньев, посвящено большое количество литературы. Закономерности пространственного положения долинной сети, связанные со структурно-тектоническими условиями, проанализированы К. И. Геренчуком на примере Русской равнины. Динамика речной сети и закономерности ее изменения в различных морфоклиматических условиях рассмотрены в работах Н. И. Маккавеева, Н. А. Ржаницина, Г. А. Нежиховского, Л. Леопольда с соавторами, К. Грегори и Д. Уоллинга. Значительное число работ освещает особенности развития речных долин в четвертичное и более раннее время. Это монографии С. С. Воскресенского с соавторами, А. И. Москвитина, Г. И. Горещкого, Ю. М. Васильева, Э. И. Равского, М. Н. Алексеева, С. А. Архипова, В. А. Зубакова, С. А. Сладкопепцева и многих других. Особое место среди работ по динамике речных долин занимают труды, в которых показаны условия образования и переноса наносов и растворенных веществ. Таковы сводки Г. И. Лопатина, Г. И. Шамова, О. А. Алекина и Л. В. Бражниковой, В. П. Зверева, К. Н. Лисициной и др. Закономерности формирования аллювия рассматриваются в трудах Е. В. Шанцера, В. В. Ламакина, А. А. Лазаренко, А. А. Чистякова и др.

При исследовании долинных ПЭК как составляющих бассейново-речных ПЭС наиболее важны сведения о поступлении, движении, отложении и выносе вещества, а также о взаимодействии процессов на днищах долин с тесно связанными с ними процессами на их склонах и придолинных пространствах.

Как и водосборные, долинные ПЭК необходимо разделять на горные и равнинные. Однако многие крупные долины своей верхней частью располагаются в горах, а нижней — на равнине. Такие долинные ПЭК можно классифицировать как горно-равнинные.

Для суждения о динамике любого долинного ПЭК первостепенное значение имеют данные о поступлении с речными водами вещества из питающих его водосборных ПЭК и изменении в связи с этим в продольном профиле главной долины характера эрозионно-аккумулятивных процессов. Врезание или, наоборот, настиление аллювия осуществляется в крупных долинах в результате нарушения их продольного профиля тектоническими движениями, а также тогда, когда он перестает соответствовать изменившемуся в результате смены климатических условий параметрам жидкого и твердого стоков реки.

Функциональные особенности долин во многом определяются литологическим составом пород, в которых они выработаны. Узкие долины, выработанные в прочных породах, и широкие, образовавшиеся в рыхлых отложениях, заполняются наносами и углубляются или расширяются с различной скоростью. Промежуточное положение занимают долины, состоящие из расширенных и суженных участков. Крупные долины, имеющие в основном суженную форму, обычно располагаются в горах. Большие широкие долины, допускающие свободные деформации русла, находятся в пределах равнин. Четковидные долины располагаются как в горах, так и на равнинах. Деформации русла в их пределах ограничены из-за наличия суженных и обычно круто-стенных участков, выработанных в прочных горных породах. Узкие долины являются малоемкими вместилищами наносов, тогда как в широких могут накапливаться большие их массы без чрезмерного увеличения уклона дна.

Горные долинные ПЭК

Транзитные интрапоясные долины в горах служат путями перемещения крупных ледников, мощных селей, временных и постоянных водных потоков.

Главной особенностью динамики крупных горных долин, занятых ледниками, является непрерывная транспортировка по ним с ледниковым стоком колоссальных масс обломочного материала. Образующиеся у конца крупных долинных ледников реки не в состоянии транспортировать дальше весь обломочный материал, приобретенный ими вместе с талыми водами ледника. Избыточная аккумуляция в верховьях таких рек является отражением несоответствия между суммарным эффектом действия всех водосборных ПЭК, привязанных к главному долинному леднику, и трансформирующей силой питаемой им реки. Несколько иную роль играют селевые потоки. Они свойственны как небольшим горным долинам, которые целиком входят в те или иные водосборные ПЭК, так и некоторым более крупным интрапоясным долинам.

По характеру проходящих селей селеопасные районы СССР Е. Л. Богдановой и соавторами объединены в две зоны: теплую и холодную. В теплой зоне, включающей районы умеренного и субтропического климата, селепроявление развито в форме водо-каменных и грязе-каменных потоков. Им свойственны высокая плотность и большая эродирующая способность. Генезис большей части таких селей ливневый. Величина суточных селеформирующих осадков в зависимости от конкретных условий не менее 15—70 мм. Согласно Е. М. Сергееву, содержание обломочного материала в грязе-каменных селях в значительной мере зависит от крутизны дна ложбины или долины, по которой он

движется. Например, в Альпах при крутизне ложа 15° его количество в потоке достигало 40—45 % от массы сели при ее плотности 1,34—1,37 т/м³. При крутизне ложа 36° двигались селевые массы, содержащие 65—70 % обломочного материала и имевшие плотность 1,49—1,53 т/м³. Большая плотность таких селевых потоков обеспечивает перенос ими крупных обломков внутри и даже у их поверхности.

Холодная зона охватывает селеопасные районы Субарктики и Арктики с повсеместно развитыми в них многолетнемерзлыми породами. Здесь распространены преимущественно водо-снежные «холодные» сели. Им присущи низкий удельный вес селевой массы и слабая эродирующая способность из-за того, что основной твердой составляющей таких селей служит фирн.

Водо-снежные сели — это мощные потоки, состоящие из смеси снег—вода с включением обломков горных пород, содержание которых по объему не превышает 4—6 %. Как показывают наблюдения В. Л. Познанина в северной части Полярного Урала, сели движутся в русле по снежной поверхности в виде потока с лобовой волной часто около 20 м и скоростью до 10 м/с. Максимальные расходы селевой массы, замеренные по следам схода селей, колеблются от 50 до 900 м³/с, а объем выносов после стекания гравитационной воды достигает 0,5 млн. м³. Отложения селей представлены в основном массой мокрого, сильно пористого снега. Максимальные размеры выносимых обломков достигают 1 м³ в поперечнике.

Как отмечают Е. Л. Богданова и соавторы, развитие селей находится в прямой зависимости от степени незащищенности горных водосборов растительностью. Поэтому сели особенно активны в аридных горах.

В селеопасных районах селевые массы выносятся либо непосредственно в предгорья и межгорные впадины, либо поступают в крупные горные долины с протекающими в них реками.

Деятельность крупных горных рек во многом зависит от того, какое они имеют питание. А. А. Чистяков [43] подразделяет горные реки умеренного пояса по характеру питания на пять категорий: 1) ледникового питания (получают свыше 38 % воды за счет ледников); 2) снегово-ледникового (ледниковое питание составляет менее 35 %), 3) снегового (менее 15 % воды ледников), 4) снегово-дождевого (оледенение в бассейне реки отсутствует) и 5) подземного (подземные воды составляют не менее 80 % речного стока). Реки ледникового и снегово-ледникового питания характеризуются длительными и относительно невысокими паводками. Реки снегового и снегово-дождевого питания имеют неустойчивый режим и бурные короткие паводки. Эти реки бывают как постоянными, так и с периодическим стоком. Реки с преимущественным подземным питанием чаще всего приурочены к предгорьям, имеют небольшие размеры и отличаются постоянством расходов в течение всего года.

От 70 до 100 % стока наносов горных рек приходится на паводки. Сток наносов за холодное полугодие (осень—зима) составляет менее 5 %. У рек с высокогорий больше 50 % стока наносов относится к летнему периоду. В то же время по долинам рек средневысотных гор (без гляциально-нивального пояса) с мощным весенним паводком переносится более 90 % годовой нормы транспортируемого обломочного материала. Расходы взвешенных наносов особенно велики во время подъема паводка. В это время содержание влекомых наносов в твердом стоке минимальное — около 10 % от всей его массы. В межень, когда перенос обломочного материала с речными водами незначителен, содержание влекомых наносов в твердом стоке увеличивается и может достигать 100 %.

В горах с характерным для континентальных условий умеренного пояса набором ландшафтных поясов от гляциально-нивального вверху до полупустынного внизу транзитные речные долины, согласно А. А. Чистякову [43], подразделяются на три зоны: 1) ледниковую или троговую, 2) горную (теснин и ущелий) и 3) предгорную. Кроме того, этот автор в пределах прилежащих равнин выделяет еще две зоны: подгорно-равнинную и дельтовую. Однако их наличие предопределяет отнесение долинного ПЭК к горно-равнинному типу.

Как уже указывалось, в верхней зоне, несмотря на значительные уклоны, происходит распластывание потоков, их интенсивное дробление на рукава и аккумуляция наносов. Во второй зоне — интенсивной глубинной эрозии — эрозионная сила рек нарастает по мере притока воды из долин, входящих в состав горных ПЭК гумидного и семигумидного климата. Избыточная аккумуляция аллювия в этой зоне долин возможна только локально. В предгорной зоне падение уклона долин играет решающую роль в смене инстративного характера их развития на констративный.

Узкие горные интрапоясные долины не всегда находились в инстративной фазе. В. И. Макаров и соавторы, проанализировав строение террасового аллювия многих крупных горных рек Средней Азии, пришли к заключению о неоднократной агградации их дниц в четвертичное время. Разновозрастные пачки аллювия четырех цикловых террас мощностью в десятки метров каждая, по их данным, соответствуют четырем холодным ледниковым эпохам средне-позднечетвертичного времени. Эти авторы подчеркивают, что изменение водности рек вообще и горных рек в частности значительно резче отражается на их работе, чем изменение уклонов их ложа.

Горно-равнинные долинны ПЭК

Крупнейшие долинны системы суши, как правило, захватывают как горные, так и равнинные территории. Для вытянутых на тысячи километров крупнейших долин суши часто харак-

терна диаметрально противоположная смена динамических режимов. Резкое изменение геологической деятельности реки происходит при уменьшении уклона при ее выходе из гор на равнину.

В предгорьях и межгорных впадинах уклоны продольных профилей у крупных рек уменьшаются до 0,2—м/км. Русла распластаиваются и превращаются в многорукавные или разветвленные, а также разветвленно-извилистые. Характерной чертой дна долин становится пойменная многорукавность. Все это говорит о преобладании аккумуляции на таких отрезках над эрозией и констративном типе развития речных долин.

На подгорных равнинах, сменяющих снизу предгорные, в одних долинах изменяется соотношение между аккумуляцией и эрозией в сторону динамического равновесия между ними, тогда как в других оно остается в принципе таким же, как и на вышерасположенном участке. В первом случае русла горных рек из многорукавных сначала становятся совершенно меандрирующими, а затем начинают сворачиваться в петли, переходя в свободно меандрирующие. Так ведут себя реки Терек, Сулак, Кума, Сырдарья, Инд, Чу и др. По-видимому, избыток наносов вод этих рек успевает отложиться в предгорьях и на подгорной равнине и их деятельность становится сбалансированной.

Из-за огромного содержания наносов этого не происходит с реками, которые остаются многорукавными и на подгорных равнинах. Таковы реки Брахмапутра, Колорадо и др.

А. А. Чистяков [43] описал особенности изменения русла р. Брахмапутры в нижнем течении, свидетельствующие о громадной подвижности зоны современной русловой аккумуляции.

Мощное и затяжное половодье на р. Брахмапутре связано с весенним таянием ледников и снега в горах и летними муссонами. Половодье, высота которого достигает 12 м, длится с апреля по сентябрь. В это время расходы воды приблизительно составляют 15000 м³/с против 5000 м³/с в зимний период. Твердый сток р. Брахмапутры оценивается в 0,8—0,9 млрд. т/год. Низкая пойма реки имеет ширину 12—14 км и представляет собой серию островов и кос различных размеров с высотой 2—3 м над руслом в межень. Они разделены многочисленными протоками. Скорость размыва низкой поймы 800—850 м/год; ее годовое нарастание за счет интенсивной аккумуляции до 900—950 м/год и более. За один паводок небольшие острова и осередки могут смещаться на расстояние 1,5—1,7 км.

В результате движения песчаных гряд за паводок в русле р. Брахмапутры могут откладываться пачки косослоистых песков мощностью до 15—17 м. Максимальные русловые формы — ленточные гряды высотой от 7 до 17 м и длиной от 200 до 1000 м формируются в максимум половодья и при его спаде. Скорость их перемещения может быть 0,3—0,5 км/сут за счет размыва сверху по течению и намыва внизу.

На высокой пойме р. Брахмапутры паводок создает обширные разливы — до 150—200 км² по площади и глубиной до 3—4 м. При этом течение почти отсутствует, благодаря чему на высокой пойме аккумулируются тонкие суглинки и илы со скоростью 2—3 см/год.

Ярко выраженный констративный тип развития дна долины р. Брахмапутры обуславливает широкую миграцию ее русла по Бенгальской равнине. Мощность аллювия, отложенного рекой при ее смещении к западу от старого русла у г. Ислампур за период 1830—1967 гг., от 20 до 40 м. Вниз по течению р. Брахмапутры мощность аллювия растет и достигает 150 м.

Данный пример показывает, что при очень большом поступлении материала на дно магистральной долины его вынос в конечный водоем стока осуществляется неполностью. Часть материала река оставляет на пологих участках дна долины. Очень велик прямой транзитный вынос в растворенной форме и особенно в виде твердого стока. Транспортируя обломочный материал, река действует наподобие бульдозера — она несет этот материал, теряет его при отложении и одновременно сдирает и захватывает сгруженные ранее наносы. Соотношение между составляющими минерального стока у таких рек выглядит следующим образом:

$$b > c > a,$$

где a — влекаемые наносы, b — взвешенные и c — растворенные соединения.

Изучение перигляциального аллювия плейстоценовых террас крупнейших речных долин умеренного пояса северного полушария показывает, что и в его составе участие указанных составляющих минерального речного стока подчинено той же зависимости. Как явствует из описаний А. А. Чистякова, взвешенные наносы господствуют и в составе аллювия р. Брахмапутры в тех местах, где русло реки пребывает в стадии интенсивной агградации. Аналогичное состояние свойственно и низовьям ряда других крупных рек (Хуанхэ, Индигирка и др.). Правда, констративная аккумуляция в низовьях р. Хуанхэ имеет ярко выраженный природно-антропогенный характер.

Геологическая работа крупных рек, находящихся в перстративной и инстративной фазах, выглядит по-иному. Е. В. Шанцер разработал учение о нормальном (перстративном) типе аллювия крупных равнинных рек. Меандрирующим рекам, формирующим нормальный аллювий, обычно свойственно преобладание растворенных соединений в валовом составе выносимого материала и незначительное (первые проценты) содержание влекаемых наносов в твердом стоке. Поэтому соотношение между составляющими минерального стока у таких рек выглядит так: $c > b > a$. Однако в перстративном аллювии оно имеет другой вид: $a > b > c$.

Уже из сопоставления двух последних зависимостей видно, что осадконакопление в долинах, находящихся в перстративной фазе, происходит в условиях меньшей насыщенности реки наносами, что и позволяет ей выносить в конечный водоем стока большую часть взвешенного материала, а меньшую оставлять на дне долины. Благодаря этому играющие незначительную роль в твердом речном стоке влекомые наносы в составе аллювия становятся преобладающими.

Функциональные особенности горно-равнинных долин во многом зависят от состава пород, в которых они выработаны. По этому показателю в пределах равнин долины разделяют на две категории: 1) выработанные в породах различной прочности и 2) образованные главным образом в рыхлых отложениях.

Долины пересекающие геологические тела с резко различным литологическим составом, характеризуются следующими особенностями. Их отрезки, выработанные в прочных скальных породах, имеют повышенные уклоны при минимальных значениях площади дна и поперечного сечения. Такие участки обычно или прямолинейные, или имеют ломаный коленообразный плановый рисунок, соответствующий направлению секущих скальные породы тектонических зон.

В мягких слабо литифицированных рыхлых породах, напротив, образуются долинные расширения, причем падение дна на таких отрезках уменьшается, а площадь его увеличивается.

Углубление долин, имеющих четковидную форму в плане и ломаную в продольном профиле, сдерживается местными базами эрозии, которыми являются выходы наиболее прочных скальных пород. Такое строение, например, имеют долины рек Енисея, Лены, Ангары и ряда других.

Образования долинного комплекса (русловые, пойменные, террасовый аллювий и покровные накопления) в такого рода долинах занимают относительно небольшие площади в сравнении с размерами протекающих по ним рек.

Значительно большая площадь принадлежит таким накоплениям в крупных долинах свободно развивающихся рек вследствие их заложения в рыхлых породах. Для этих долин характерна большая ширина (многие километры) и, как следствие этого, большие площади развития отложений долинного комплекса. Возможность значительного блуждания реки по дну долины и образования весьма широкой зоны пойменно-русловой аккумуляции в условиях сплошного развития податливых к размыву рыхлых пород обусловили разработку долин вширь. О. М. Кирик и Н. В. Чернов установили, что в регионах ограниченного развития русловых деформаций, т. е. там, где они сдерживаются наличием прочных пород, отношение ширины поймы и русла колеблется от 0,3:1 до 1:1, тогда как у свободно развивающихся рек оно меняется от 1:1 до 10:1.

Равнинные долинные ПЭК

Крупные интразональные речные долины, полностью расположенные в пределах равнин, во многом похожи на равнинные отрезки горно-равнинных долинных ПЭК. Специфическим для долинных ПЭК равнин является то, что они обычно моделируются речными потоками с невысокой или даже весьма низкой мутностью. Поэтому при наличии достаточных уклонов дна долины таких рек большей частью находятся в инстративной или перстративной фазах. Констративная аккумуляция происходит чаще всего под воздействием тектонического фактора. Кроме того, она может осуществляться в нижнем течении равнинных рек при смене гумидных условий на аридные или бореально-арктические.

Приморско-дельтовые ПЭК

Крупнейшие долины суши, как правило, продолжают и на морском дне, где по ним также осуществляется движение поставляемых реками наносов. Поэтому речные дельты можно считать внутривалными образованиями.

Изучению речных дельт посвящены сводки И. В. Самойлова, В. Н. Михайлова, обобщающие данные ряда зарубежных авторов. Так, данные по особенностям динамики дельт обобщены в работе Ж. Колемана и Л. Райта [16]. Согласно представлениям двух последних авторов, аккумуляция наносов и формирование дельтовой равнины происходит там, где река теряет функцию транспортирующего агента и превращается в рассеивающую систему. Динамика последней определяется взаимодействием речных и морских процессов. Самыми важными в формировании дельты, согласно Ж. Колеману и Л. Райту, являются: 1) климат в пределах водосбора, 2) рельеф водосборного бассейна, 3) расход воды, 4) поступление наносов, 5) климат в пределах дельты, 6) устьевые процессы, 7) береговая волновая деятельность, 8) приливы, 9) ветры, 10) береговые течения, 11) наклон шельфа, 12) тектоника приемного бассейна, 13) форма приемного бассейна. Четыре из перечисленных тринадцати групп процессов действуют опосредствованно и служат важнейшими параметрами водосборных ПЭК и объединяющих их долинных ПЭК.

Климат и рельеф водосборного бассейна определяют характер и режим водного и минерального стоков реки. Климатические условия дельтовой равнины контролируют распределение различных фаций и генетических типов в толще дельтовых накоплений. В частности, в тропическом и арктическом климате создаются благоприятные условия для формирования торфяных залежей. Кроме того, в арктических условиях велика роль под-

земного льда, включение которого в дельтовые накопления может только ускорять рост дельт, как это показано В. Н. Коротавым и А. Ю. Сидорчуком. При наличии аридного климата большую роль в переработке речных наносов играют эоловые процессы, приводящие к формированию эолового покрова. В различных частях дельт, но особенно в нижних, образуются эвапориты.

Водный режим рек во многом определяет состав дельтообразующих наносов. Реки со сравнительно низким общегодовым расходом, приходящимся в основном на короткий период интенсивного паводка, могут выносить к побережью более грубый материал, чем реки с более высокими, но равномерно распределенными в течение года расходами.

Количество наносов, выносимых реками, влияет на процессы в литоральной зоне. Чем больше вынос, тем существеннее их нарушение. Вблизи устьев крупных рек количество наносов у береговой линии очень велико и здесь, как, например, на р. Миссисипи, обычно формируются линейные вытянутые песчаные тела, простирающиеся под большими углами к берегу.

Устьевые процессы определяются взаимодействием речных потоков с водами приемного бассейна. При этом происходит рассеивание энергии реки и утрата ее транспортирующей способности. В конфигурации приустьевых баров, окаймляющих дельты извне, отражаются различия в характере устьевых процессов у разных рек.

От интенсивности волнового воздействия значительно зависят степень отсортированности дельтовых песков и их минералогический состав. Под действием волн большой силы (более 20 Вт) образуются чистые, хорошо отсортированные пески с повышенным содержанием кварца, а иногда и чисто кварцевого состава. Дельтовые песчаные тела, сформированные в условиях слабой волновой активности (менее 1 Вт), являются продуктом речных процессов, чаще всего плохо отсортированы и содержат глинистые прослойки.

В составе дельтовых накоплений запечатлевается влияние приливов. В устья рек, затапливаемых высокими приливами, часто привносится грубый материал. У таких макроприливных рек устья имеют форму колокола и оказываются забиты песчаными отмелями. В дельтах наблюдаются сильные паводки, а паводковые отложения интенсивно накапливаются в пойменных ложбинах. Приливы и отливы содействуют также формированию больших линейных песчаных гряд, обращенных от устьев рек в сторону моря. Дельты, где преобладают очень высокие приливы, часто представляют собой приливную равнину, по фациальным условиям существенно отличную от дельт, формирующихся при низких уровнях приливов.

Ветры, особенно когда они дуют с моря, сильно перерабатывают поверхностную часть дельтовых накоплений и форми-

руют золотой чехол. От кромки моря такие ветры уносят большое количество песка и пыли в глубь суши. Течения, создаваемые действием ветра, играют существенную роль в перемещении наносов в районах с низкими уровнями приливов. Такое же действие возникает под влиянием глубоких океанических течений, а также так называемые плотностные течения.

Шельфы, примыкающие к дельтам, имеют меньший угол падения, чем шельфы, примыкающие к берегам за пределами дельт. Крутизна склонов современных дельт колеблется от $0,003^\circ$ (р. Парана) до $0,480^\circ$ (р. Сенегал). От наклона шельфа во многом зависит тип смещения дельты. В районах с очень пологим береговым склоном миграция дельт имеет лопастной характер и вся дельтовая равнина состоит из перекрывающих друг друга и взаимно проникающих дельтовых лопастей, как, например, это имеет место в дельтах рек Миссисипи и Параны. В местах, где крутизна шельфа достигает средних величин, миграция дельт обуславливается смещением русла по дельтовой равнине, в результате чего образуется новое русло реки со своей дельтой. Таковы дельты рек Хвонг-Хо и Ганг-Брахмапутры. Третий тип смещения дельт — устьевое удлинение (дельты рек Дуная и Красной) характерен для относительно крутых береговых склонов. Два больших рукава или более прорываются в одной точке в верховьях дельты и затем продолжают, не разветвляясь к устью. Некоторое время через один из рукавов проходит основная часть водного и твердого стоков. Этот рукав активно выдвигается в море, а другие протоки подвергаются действию волн и их продвижение ослабевает. В конечном итоге активный рукав вследствие своего удлинения теряет преимущество в уклонах и основные расходы реки перемещаются в одну из других проток. Процесс повторяется несколько раз, и в результате образуется дельтовая равнина со сложными разрезами береговых валов.

Быстрое опускание, фиксирующееся для многих дельт, обусловлено как тектоническими причинами, так и их внутренними изменениями толщи осадков. Тектонически обусловленной является форма приемного бассейна (узкий структурный прогиб, окраина крупной тектонической депрессии и др.). От нее зависят многие особенности геологического строения дельтовых толщ [16].

Рассмотрение общих особенностей динамики современных дельт свидетельствует о большой напряженности идущих в их пределах экзодинамических процессов. Эта напряженность вытекает из конечного положения дельт в бассейново-речных ПЭС. Само образование дельт представляет собой результат взаимодействия экзодинамических систем суши с аквальными экзодинамическими системами, которыми являются Мировой океан и крупнейшие бессточные внутриконтинентальные водоемы. Таким образом дельты — последние в пределах суши звенья

крупных долин — оказываются своего рода мостами, связывающими процессы внешней динамики суши и моря.

Следует остановиться на роли бассейново-речных ПЭС в экзодинамике земной коры суши в целом. Развитие таких ПЭС по типу врезания может происходить только при наличии в их пределах достаточно хорошо развитого почвенно-растительного покрова. Следовательно, только трансформированные живым веществом ПЭС могут развиваться в бассейново-речные. Вот почему эрозионно-денудационный рельеф всегда фиксируется глинистой корой выветривания.

Большая часть неледниковой суши занята и преобразуется извне бассейново-речными ПЭС. И хотя так было не всегда, трансформированные живым веществом ПЭС, по-видимому, были наиболее устойчивыми системами на континентах в геологическом прошлом. Об этом свидетельствуют: 1) преобладание глинистых пород в составе осадочной оболочки Земли и 2) широкое развитие в составе гранитно-метаморфического слоя продуктов преобразования и переплавления глинистых пород. Таким образом, континентальные ПЭС, трансформированные живым веществом, являются уникальными и длительно существующими. Именно их наложение на тектонические структуры материков определяет большинство особенностей строения рельефа и поверхностных образований суши.

ПРОТОЧНО-ОЗЕРНЫЕ ПЭС

Крупные проточные озера обычно перехватывают сток нескольких рек, а питают одну. Наряду с веществом, содержащимся в речных водах, озерные котловины получают его при абразии берегов и мелководий, эоловым путем и в результате действия некоторых других экзодинамических агентов.

В котловине проточного озера оседает большая часть приносимого обломочного материала, а вносимые растворенные соединения оказываются в основном транзитными. Воды реки, вытекающей из озера, обычно характеризуются низким содержанием наносов и поэтому потенциально могут принять в себя большое количество обломочного материала. С этим же связана и их повышенная эродирующая способность.

Наиболее полные материалы по балансу вещества проточно-озерной ПЭС имеются по Великим Озерам Северной Америки. Хотя геологическая деятельность этих озер отчетливо изменена под влиянием антропогенного фактора, по ряду сведений можно судить и о природных характеристиках некоторых процессов.

Огромные и весьма динамичные водоемы окружены берегами, сложенными в значительной степени рыхлыми накоплениями. Поэтому главным поставщиком обломочного материала для большинства из них является береговая абразия. Значительно меньше приносится его с речным стоком и еще меньше

ветром. В современных условиях эоловая поставка частиц имеет примерно такие же масштабы, как и аккумуляция в илах автохтонного органического вещества.

Озерные водоемы, ограниченные скальными берегами, вероятно, больше всего обломочного материала получают с речным стоком. Поэтому в таких озерах при прочих равных условиях темпы седиментации оказываются значительно ниже, чем в озерных впадинах с берегами из рыхлых пород.

Неравномерность развития абразионных процессов зависит не только от состава пород берегов и мелководий, но и от гидрогеологических условий. В местах сильного обводнения береговых образований разрушение проявляется особенно сильно благодаря частым оползням. Современная скорость отступления абрадируемых берегов, сложенных рыхлыми породами, у Великих Озер колеблется от долей до первых метров в год. Особенно сильно они абрадируются в периоды совпадения штормовой активности и повышения уровня воды, как это бывает осенью. Наряду с разрушающимися, есть и стабильные участки берегов.

В озерных водах обломочный материал дифференцируется по крупности и преобладающий алеврито-глинистый аккумуляруется в седиментационных бассейнах, а более грубые обломки формируют маломощный покров на дне вне их. Седиментация алеврито-глинистых осадков в оз. Онтарио до начала интенсивного хозяйственного освоения его бассейна и берегов, по данным А. Кемпа и Н. Харпера, шла со скоростями от 0,1 до 6,9 т/га·год.

Проточно-озерные ПЭС — природные разделители бассейново-речных ПЭС. В проточных озерах на работу собственной водной массы влияют процессы, идущие в привязанных к ним речных бассейнах.

БЕССТОЧНО-ОЗЕРНЫЕ ПЭС

Бессточные котловины крупных озер ассимилируют весь материал, поступающий в них с водотоками, ветром, подземным стоком, а также в виде продуктов абразии и автохтонного органического вещества. Большая его часть переходит в состав осадков, однако некоторая небольшая доля выносится ветром, причем в составе направленного из озера эолового потока преобладают соли.

Одним из крупнейших бессточных озер является Аральское море. Экзодинамика этого бессточно-озерного ПЭС в настоящее время сильно изменена в результате антропогенного воздействия на его водный бюджет. Ю. П. Хрусталева и С. Н. Резникова произвели примерный расчет прихода вещества в Арал, имевший место до зарегулирования рек Амударья и Сырдарья. По их данным, в составе осадочного материала, поступающего в Арал, резко преобладают твердые и растворенные продукты

речного стока, меньше эолового материала и еще меньше продуктов абразии. Автохтонное органическое вещество, переходящее в захоронение, по массе занимает последнее место среди компонентов, образующих донные осадки. Величина ежегодной аккумуляции осадков в Аральском море (131 млн. т) характеризует ускоренный природно-антропогенный процесс.

Одной из важных особенностей динамики ряда бессточных озер является существенное колебание их площади. Например, площадь Большого Соленого озера (штат Юта, США) в различные годы меняется от 2,7 до 5,9 тыс. км². Вследствие таких изменений донные осадки с периодически осушающихся участков дна озер подвергаются дефляции и частичному удалению на более высокие элементы рельефа прилежащих территорий.

ЭОЛОВЫЕ ПЭС

Области, в экодинамике которых преобладают эоловые процессы, сосредоточены в основном на материках восточного полушария. Главным показателем подавления бассейново-речного механизма движения вещества в них ветровыми процессами является наличие специфического эолового рельефа и поверхностных отложений.

Своеобразие эоловых ПЭС наглядно показано в работах Б. А. Федоровича. Составленная им мелкомасштабная картограмма (рис. 2) рельефа песков одной из частей пустынной области Средней Азии позволила осветить макродинамику эоловых процессов. Б. А. Федорович [37], анализируя картограмму, отмечает:

1. Находящиеся на пути ветров горные хребты, круто поднимающиеся над равнинами, отражают нижнюю часть воздушного потока и создают области «предлобовых завихрений» и «предлобовых валов» с поперечными ветрам песчаными грядами (левый нижний угол картограммы). Предлобовые образования простираются на расстояния, в 30—35 раз превышающие высоту препятствия. Перед Копет-Дагом с отметками до 3 км они занимают полосу шириной около 100 км.

2. Обрывы и кузсты высотой в десятки и сотни метров независимо от их ориентировки относительно направления ветра являются местами зарождения восходящих вихревых потоков. Последние формируют «желоба выдувания» (верхняя часть картограммы). Выдуваемый материал дифференцируется: пески накапливаются вблизи этих желобов, а пыль подвергается дальнейшей транспортировке.

3. Из-за слоистости атмосферы разнонаправленные воздушные потоки часто располагаются очень близко один над другим. При этом один поток может оказывать воздействие на подложное плато, а другой — на его поверхность при разности высот

между ними всего в сотню метров (правая верхняя часть картосхемы).

4. В соответствии с законами аэродинамики главные воздушные потоки устремляются от областей высокого к областям низ-

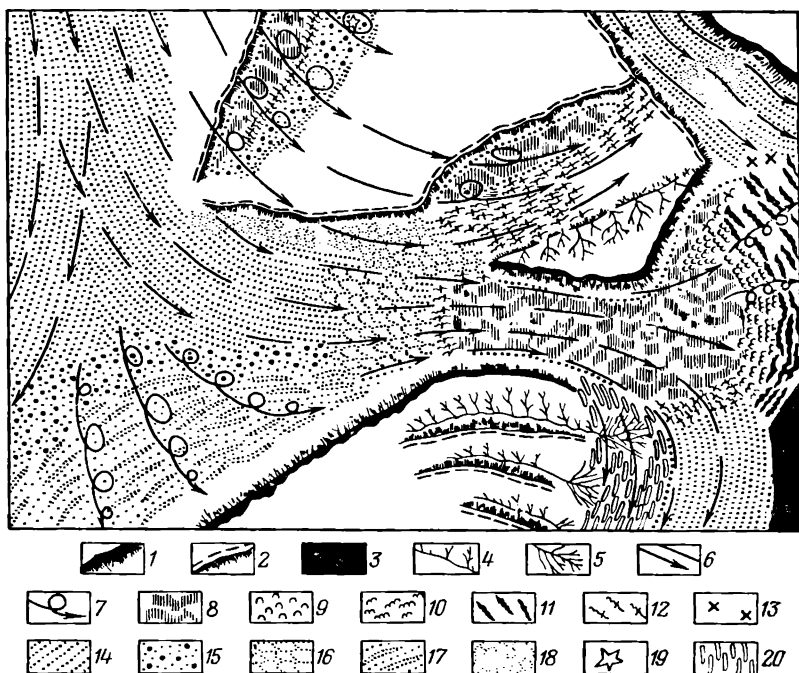


Рис. 2. Картосхема рельефа песков (по Б. А. Федоровичу, 1970 г.):

1 — скалистые склоны гор; 2 — обрывы плато и куэст; 3 — море; 4 — гидрографическая сеть; 5 — конусы выноса; 6 — направления господствующих ветров; 7 — турбулентность ветров в районах торможения и пересечения орографических рубежей; 8 — солончаки районов развевания и оголенные пески; 9 — барханы; 10 — барханные цепи; 11 — комплексные барханы; 12 — барханные гряды, продольные ветру; 13 — оголенные песчаные пирамиды и полузасоршие пески; 14 — песчаные гряды, продольные ветру; 15 — грядово-ячеистые пески; 16 — лунковые пески; 17 — поперечные гряды; 18 — ячеистые пески; 19 — пирамидальные полузасоршие пески; 20 — лёссовые гряды

кого давления по наиболее низким элементам рельефа (все среднее поле картосхемы).

5. При сжатии воздушного потока, обусловленного орографией, происходит его ускорение и меняется экзодинамический эффект. Так, в условиях климата Средней Азии при среднегодовой скорости ветра 3—4 м/с господствует дефляционно-аккумулятивное рельефообразование песков, замедленное наличием разреженной злаковой растительности. При скоростях ветра в среднем около 5 м/с становится ландшафтным аккумулятивно-дефляционное рельефообразование песков, ускоренное отсутст-

внем или крайней разреженностью растительности. В районах со среднегодовой скоростью ветра более 5 м/с преимущественным развитием пользуются дефляционные процессы, часто сопровождающиеся формированием солончаков (средняя часть картосхемы).

6. При расширении воздушного потока и обусловленном этим его замедлением происходит аккумуляция эолового материала как песчаного, в основном влекомого, так и более тонкого пылеватого и глинистого, выпадающего из воздушной взвеси. В этих условиях песчаные накопления по мере уменьшения скорости ветра переходят в гряды и увалы, состоящие преимущественно из более тонкого материала (нижняя правая часть картосхемы).

7. Водные бассейны, значительную часть года более холодные, чем окружающая суша, оказывают либо тормозящее действие на ветровые потоки, либо способствуют образованию бризово-муссонных ветров. В условиях замедления и смены ветров противоположных направлений чаще всего формируются поперечные барханные цепи, аналогичные поперечным барханным грядам предлобовых валов (середина правого края картосхемы).

8. В районах сезонной смены направления ветров на примерно перпендикулярное наблюдается наложение одних сезонных форм рельефа песков на другие. В крупных песчаных формах образуется решетчатый рельеф, состоящий из гряд, продольных одним и другим ветрам (середина левой части картосхемы).

9. В областях проникновения циклонов осуществляется смена ветров всех направлений. Здесь так же, как и в районах преобладания восходящих конвекционных потоков, возникает грядовой рельеф (середина картосхемы под обрывом плато).

10. В районах интерференции одновременных разнонаправленных воздушных потоков развеваются пирамидальные формы рельефа как полузаросших, так и оголенных песков (середина и правый край верхней части).

Данные Б. А. Федоровича свидетельствуют об огромной динамичности эоловых ПЭС, о ведущей или очень большой роли ветра в перераспределении обломочного материала не только в областях песков, но и в местах распространения отложений иного гранулометрического состава.

В другой работе Б. А. Федорович приводит сведения о скоростях дефляции и эоловой аккумуляции в пустынях. Так, незаполненные плиоценовые и четвертичные отложения песчано-грубообломочного, песчаного и существенно глинистого состава при среднегодовых скоростях ветра в 5—8 м/с ежегодно развеваются на глубину в первые сантиметры (в среднем на 3 см в год).

Интенсивному развеванию подвергаются солончаки. При среднегодовых скоростях ветра в 5—7 м/с дефляция солончаков с близко расположенными к поверхности грунтовыми водами колебалась от 0,7 до 7,1 см/год (средняя скорость 3,3 см/год).

Сходные и несколько меньшие показатели получены для процессов навевания и развевания оголенных и полужаросших песков.

Большая часть матернала, перемещающегося на площадях эоловых ПЭС, остается внутри них и только меньшая часть удаляется за их пределы.

Пример пустынь Средней Азии показывает, что эоловые ПЭС как бы накладываются на ослабленные периферические части действующих бассейново-речных и бессточно-озерных ПЭС и особенно на площади, где те и другие закончили функционировать и перешли в реликтовое состояние. Таким образом, огромные количества рыхлого осадочного матернала, в основном аллювиального, озерно-аллювиального и озерного генезиса, оказываются в сфере действия эоловой ПЭС.

Ветровая мобилизация, транспортировка и аккумуляция вещества имеют свои особенности, важнейшей из которых, как уже упоминалось, является дифференцированный вынос песчаного и более тонкого матернала. Даже в безветренные дни входящие струи нагретого воздуха образуют в пустынях смерчи — столбы пыли высотой 200—500 м. При наличии ветра перенос частиц усиливается. Массовый переход пылеватого матернала в воздушную среду начинается при его скоростях в 3—4 м/с. При скоростях ветра в 11 м/с и более возникают настоящие пыльные бури.

Пыль и более мелкие частицы поднимаются на высоты в несколько километров, тогда как песчаный матернал в основном движется в приземном слое и на дальние расстояния перемещается только при ураганных ветрах. Лишь при однонаправленных сильных ветрах песчаные массы постоянно двигаются по их направлению. За год песчаные дюны могут продвигаться на расстоянии в десятки метров [1].

Согласно А. П. Лисицину [22], важнейшими системами дальнего переноса пыли являются атмосферные струйные течения. Они представляют собой воздушные потоки, перемещающиеся со скоростью более 30 м/с, которые, подобно плоским трубам, волнообразно огибают земной шар. Обычно струйные течения функционируют на высотах 7—11 и 17—20 км и имеют горизонтальную протяженность 500—2000 км, а в ряде случаев свыше 4000 км. Благодаря этим потокам воздуха время пребывания пыли в атмосфере может быть очень значительным, иногда до 5—6 лет. Скорость переноса пыли может достигать 500 км/ч, при этом аэрозоль верхних слоев атмосферы нередко многократно огибает Землю [22]. Время пребывания частиц в тропосфере обычно колеблется от 6 дней до 2 недель. В нижней стратосфере частицы размером 1 мкм могут оставаться в течение 1—3 лет.

Преимущественное удаление пылеватого и более тонкого матернала из пределов эоловых ПЭС, вероятно, является одной

из главных причин превалирующей роли песков среди аккумулятивных накоплений этих территорий. Другой такой причиной служит широкое развитие песчаных отложений в составе аллювия, отлагаемого в пустынях крупными транзитными реками.

В составе разносимого ветром материала закономерно присутствуют зерна минералов-солей: гипса, галита, соды и др., поднимаемые с территорий, которые покрыты засоленными почвами или эвапоритами. Изъятие солей с таких площадей может достигать огромных размеров. Согласно М. А. Орловой, для засоленных почв древней дельты р. Чу модуль эолового удаления солей может достигать $40 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$, а для таких же почв современной дельты $728 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$. Таким образом, ветер перераспределяет соли из районов их концентрации в поверхностных образованиях в другие места, в том числе и далеко за пределы эоловых ПЭС.

Краткое рассмотрение особенностей эоловых ПЭС показывает, что они играют совершенно особую роль в экзодинамическом преобразовании суши. В большинстве своем они представляют собой бессточные территории, с которых воздушным путем выносятся пылеватый и более тонкий материал и в меньшей степени песчаный. Одновременно отдельные, чаще депрессионные участки эоловых ПЭС получают вещество, приносимое из соседних регионов в виде солей подземных вод и эоловых частиц.

АНТРОПОГЕННЫЕ И ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫЕ ЭКЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Таксономия процессов, связанных с деятельностью человека, в настоящее время только вырабатывается. Чтобы использовать существующие разработки для разграничения экзодинамических процессов, кратко рассмотрим представления ряда авторов.

Е. М. Сергеев [32] указывает на наличие природных, измененных человеком и вновь созданных им процессов. Последние он называет инженерно-геологическими или антропогенными и подразделяет на группы: 1) глобальных, 2) локальных повсеместно распространенных, 3) региональных и 4) собственно локальных процессов.

Примером глобальных процессов могут служить мощные ядерные взрывы. Локальные повсеместно распространенные процессы — это изменения напряженного состояния пород под воздействием статических и динамических нагрузок при строительстве различных сооружений и при вскрытии массивов пород искусственными выработками; гидрогеологических условий при откачке подземных вод, часто ведущее к оседанию земной поверхности; рельефа при градостроительстве с общей тенденцией к нивелировке поверхности, что в свою очередь приводит к затуханию ряда геологических процессов. Примером зональных процессов могут служить термокарст, солифлюкция, наледи и целый ряд других явлений, часто возникающих в связи с нарушением температурного режима грунтов в криолитозоне в результате инженерно-хозяйственной деятельности человека. Примером региональных антропогенных экзодинамических процессов могут быть просадки в лёссах, а эндодинамических — землетрясения, вызванные заполнением того или иного водохранилища. Связь подобного рода процессов с определенными инженерно-геологическими регионами позволяет называть их региональными. Наконец, к собственно локальным отнесены, например, прорывы вод в выработках.

Деление Е. М. Сергеевым геологических процессов, связанных с деятельностью человека, на группы базируется на изучении закономерностей их территориального распределения. При этом в основном рассматриваются инженерно-геологические процессы. Однако изменение земной коры вызывают не только они, но и многие другие виды хозяйственной деятельности человека.

Попытка отразить различие в характере антропогенного воздействия в названии двух крупнейших групп геологических процессов сделана Э. Т. Палиенко. Он пишет, что антропогенные процессы приводят к таким изменениям в рельефе и свойствах горных пород, которые не могут возникнуть без вмешательства человека. Например, такими являются различного рода гравитационные процессы на склонах карьеров (осовы, обвалы, оползни), водная эрозия в бортах различных выработок и насыпей, суффозия, осадка, усадка, просадка в лёссовых грунтах. Природно-антропогенные процессы, по мнению того же автора, связаны в основном с сельскохозяйственной деятельностью человека, однако осуществляются они по законам природных экзодинамических процессов, а человек как бы подталкивает их к проявлению. Сюда входят ускоренная эрозия (размыв и плоскостной смыв) и аккумуляция, суффозионно-просадочные явления, заболачивание и засоление почв, обвалы, оползни при подрезании естественных склонов.

Критерии, предлагаемые Э. Т. Палиенко для разделения антропогенных и природно-антропогенных процессов, вряд ли могут быть широко использованы. Например, овражная эрозия в природных рыхлых отложениях и в антропогенных свалах внутри оврага — это в принципе однотипный процесс. Его развитие обусловлено наличием линейного стока в пределах наклонной поверхности, сложенной рыхлыми породами. Однотипным можно считать и делювиальный смыв на пашне и пологом склоне карьера. Подобных примеров можно было бы привести еще много. Однако и рассмотренных достаточно, чтобы заключить, что деление процессов на антропогенные и природно-антропогенные не удается совместить с различными видами деятельности человека, меняющей строение земной коры.

Ф. В. Котлов к природно-антропогенным причисляет природные геологические процессы и явления, измененные человеком, но возникающие независимо от его деятельности. Антропогенные геологические процессы и явления — «совершенно самостоятельная и обособленная категория геологических процессов и явлений, возникновение, проявление и развитие которых связано с инженерно-хозяйственной и культурно-бытовой деятельностью человека» [18]. Эта в принципе верная трактовка различия между двумя крупнейшими группами геологических процессов должна быть лишь несколько конкретизирована. Такая конкретизация возможна исходя из различия их энергетики. Любые действия человека, меняющие земную кору, обеспечиваются расходом контролируемой им энергии. Однако при этом нарушаются природные резервуары энергии и энергопотоки. *Все изменения земной коры, по своей энергетике более или менее эквивалентные израсходованной человеком энергии, следует рассматривать как антропогенные. Все остальные геологические события, связанные с деятельностью человека, но*

в основном развивающиеся благодаря огромному превосходству природного энергетического вклада над сделанным человеком, можно отнести к разряду природно-антропогенных.

Антропогенные экзодинамические процессы могут быть разделены на процессы-мероприятия и процессы-следствия. Первые являются полностью управляемыми и представляют собой различного рода действия, нарушающие природное состояние земной коры. К таким действиям принадлежат обработка полей, выпас скота, строительство, горные разработки, перемещение транспорта, сгруживание отходов и многое другое. Все такие мероприятия в отдельности или в определенных сочетаниях меняют земную кору. Эти изменения выглядят весьма различно и могут рассматриваться как денудационные (деструктивные) или аккумулятивные антропогенные образования в широком понимании этих терминов.

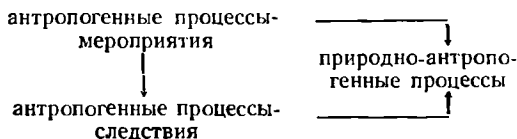
Площади, используемые человеком для получения сырья, топлива, продуктов питания, а отчасти и воды, в основном подвергаются антропогенной денудации, тогда как территории, где скапливаются избыточные массы перемещенного и различным образом переработанного им вещества,— это области антропогенной аккумуляции.

Антропогенная денудация — это не только выемка и вывоз грунтов или полезных ископаемых. Это также и избыточное извлечение подземных вод, полное или частичное уничтожение растительного покрова и некоторые другие процессы. Антропогенная аккумуляция — это создание конструкций, покрытий, свалок и даже такие мероприятия, как внесение в почву удобрений. Антропогенная денудация и аккумуляция обычно накладываются одна на другую. Например, строительство жилых зданий и созданию дорожных покрытий (аккумулятивные процессы) предшествует сведение природной растительности, а местами достаточно значительная выемка грунта (денудационные процессы).

Каждое более или менее крупное антропогенное образование нарушает природную динамику земной коры непосредственно в месте, где оно находится, и опосредствованно на связанных с ним участках. Так, нагрузка сооружения, динамические воздействия от него (например, вибрация, утечки воды и рассеивание тепловой энергии в результате его функционирования) — все это, как показал Ф. В. Котлов [18], приводит к изменению строения участка земной коры в районе здания, к ее антропогенной модификации в массиве. Иначе выраженная антропогенная модификация земной коры, в основном ее верхнего почвенного слоя, происходит, например, при вытаптывании (рекреация, перевыпас) или движении тяжелых сельскохозяйственных машин (обработка земель). Во всех этих случаях изменения земной коры в массиве в целом обеспечиваются затратами энергии, контролируемой человеком. Поэтому они могут рассмат-

риваться как антропогенные процессы-следствия на одноименные процессы-мероприятия.

Антропогенные образования отдельно и в совокупности нарушают и видоизменяют природные литосферные, гидросферные и атмосферные потоки вещества. Видоизмененные потоки, а также результаты их деятельности являются выражением природно-антропогенных процессов. Например, абразия берегов водохранилища — это природно-антропогенный процесс, а илы, формирующиеся в его чаше, — природно-антропогенные осадки. Потоки вещества природно-антропогенного происхождения в пределах освоенных территорий четко выделяются в соответствующих звеньях атмосферы, гидросферы и земной коры. В целом связанная с деятельностью человека экзодинамика земной коры в общей форме может быть представлена в таком виде:



Учитывая тесную связь между таксономически различными типами процессов, ее рассмотрение осуществлено по видам этой деятельности. Следует подчеркнуть, что изложение данных по антропогенным процессам-мероприятиям носит сугубо обзорный характер и зачастую ограничивается их перечнем. При этом разделение этих процессов сделано в первую очередь с учетом их неодинакового эффекта по отношению к земной коре.

Различные виды деятельности человека, влияющие на земную кору, можно объединить по их специфике в несколько типов мероприятий. Такими являются: 1) сельскохозяйственные (полеводство и пастьба), 2) лесохозяйственные, 3) водохозяйственные, 4) добыча полезных ископаемых, 5) коммуникационно-транспортные вне городов, 6) урбано-промышленные, 7) рекреационные и 8) военные мероприятия. Следует учитывать, что многие из них могут проявляться совместно.

ТЕРМИНОЛОГИЯ

Прежде чем приступить к рассмотрению антропогенных и природно-антропогенных процессов в соответствии с выделенными типами деятельности человека, необходимо оговорить применение некоторых терминов.

В отечественной литературе широкое употребление имеют термины «водная эрозия» и «ветровая эрозия», хотя логичнее употреблять их синонимы «эрозия» и «дефляция».

Применительно к термину «водная эрозия» дело не ограничивается заменой его на более лаконичный синоним, так как

в него обычно вкладывается более широкий смысл, когда речь идет об «ускоренной эрозии». Так, Г. И. Швобсом [44] «водная эрозия» определяется как часть процесса денудации, состоящего из разрушения, перемещения и отложения частиц почвы и пород под действием дождя и текущей воды и подчиняющегося законам падения капель и движения водных потоков. Этот автор относит к водно-эрозионным процессам: 1) воздействие капель дождя, 2) поверхностный смыл, 3) струйчатую (мелкорытинную) эрозию, 4) овражную эрозию, 5) русловую эрозию, включая действие селей, и 6) подземную эрозию, включая суффозию. Из данного перечня видно, что Г. И. Швобс вкладывает в понятие «водная эрозия» настолько широкий смысл, что его употребление резко нарушает широко принятую среди геологов и географов классификацию экзодинамических процессов, в соответствии с которой эрозия трактуется как составная часть флювиального процесса, а деятельность селей, суффозия и площадное действие дождя и града, а также поверхностного смыва рассматриваются как особые процессы.

Данной аргументацией приходится, однако, поступиться при оперировании термином «эрозия почв».

Под эрозией почв в нашей стране все большее число исследователей вслед за М. Н. Заславским и Н. И. Маккавеевым понимают лишь их смыл и размыв водными потоками.

Эрозия почв подразделяется М. Н. Заславским [11] на поверхностную (плоскостную) и линейную, причем им подчеркивается, что данный процесс является функцией временных потоков, к которым принадлежат: 1) талые воды, 2) дождевые воды, 3) воды орошения, 4) выклинивающиеся подземные воды и 5) сточные воды. При поверхностной эрозии почва последовательно превращается в слабо-, средне- и сильносмытую, при линейной возникают промоины и овраги.

В. П. Лидов считает, что подразделение эрозии на плоскостную (поверхностную) и линейную неправомерно. По его мнению, твердый сток всегда связан со струйчатым жидким стоком и поэтому водную эрозию на пахотных угодьях или на лесных газах следует называть мелкоструйчатой склоновой эрозией.

Отрицание поверхностной (плоскостной) эрозии В. П. Лидовым, по-видимому, неправомерно, если вспомнить о пластовом склоновом стоке, возникающем при сильных ливнях в аридных областях и при продолжительных и обильных дождях в гумидных регионах.

Снос и аккумуляция вещества, осуществляющиеся по склонам сплошной пеленой воды, строго говоря, представляют собой крайнее и наиболее энергичное выражение делювиального процесса. Однако при изучении ускоренной денудации почв делювиальный процесс рассматривается чаще всего как один из видов эрозии почв. Таким образом, термин «эрозия почв» в современном его понимании является более широким, чем понятие

эрозия, применяемое для обозначения одного из главных природных экзодинамических процессов.

В то же время термин «эрозия почв» не включает в себя представление о размыве участков днищ долин с развитыми на них почвами постоянными водотоками. Таким образом, боковая и глубинная эрозии рек и ручьев, наносящие ущерб почвам, не являются «эрозией почв». Также не включается в последний термин и туннельная эрозия, происходящая чаще всего в лёссовых грунтах. Туннельная эрозия обычно приурочивается к нижним частям склонов, где временный водоток обладает достаточным расходом и уклоном, чтобы осуществлять размыв под поверхностью.

Итак, при рассмотрении ускоренной природно-антропогенной эрозии термины «эрозия почв», «эрозия постоянных водотоков» и «туннельная эрозия» будут использоваться как самостоятельные и взаимоисключающие друг друга.

В американской литературе эрозией почв считается удаление ее материала любым агентом внешней динамики. Факторами эрозии, как указывает О. С. Оуэн, могут быть ветер, вода, морские волны, оползни и др. Применительно к ускоренной денудации почвы американские авторы чаще всего употребляют термины поверхностная (плоскостная), ручейковая (линейная), овражная и ветровая эрозии. Как указано в работе [49], плоскостная эрозия — это удаление тонкого поверхностного слоя. При этом, если специально не выделена ручейковая эрозия, то последнее понятие входит в интерпретацию термина «плоскостная эрозия». Под ручейковой эрозией отдельно понимается такой линейный размыв почвы, который ликвидируется при культивации почвы сельскохозяйственными машинами. Многие американские авторы пишут о совместной плоскостной и ручейковой эрозии, противопоставляя ее другим видам эрозии почв. Под овражной эрозией подразумевается линейный размыв с образованием таких эрозионных форм, которые не могут быть полностью заравнены при обычной обработке полей.

Эрозия почв в одних случаях может быть антропогенной («иригационная», связанная с утечками вод и др.) и природно-антропогенной. То же можно сказать и об ускоренной дефляции. Правда, природно-антропогенное выдувание почв и рыхлых материнских пород имеет громадные масштабы, тогда как антропогенное — гораздо меньшие. Но и последнее при таких мероприятиях, как взрывы, движение автотранспорта, а также взлет и посадка летательных аппаратов становится все более ощутимым.

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ И ИХ СЛЕДСТВИЯ

Наиболее целесообразно рассмотрение экзодинамики, связанной с деятельностью человека, начать с изменений, имеющих место на сельскохозяйственных землях. Именно они являются

теми территориями, для которых получен большой материал о процессах, вызванных или измененных антропогенным фактором. В первую очередь это относится к сельскохозяйственным территориям.

Земледелие

Для того чтобы превратить естественные пространства в возделываемые поля, человек вынужден был свести растительность, уничтожить природную почвенную подстилку и нарушить поверхность почвы. Столь сильное разрушение буферного устройства земной коры, предохраняющего ее от чрезмерного механического сноса, влечет за собой колоссальные последствия, главным из которых несомненно является ускоренная денудация почв на полях и примыкающих к ним пространствах.

Использование земель для выращивания сельскохозяйственных культур осуществляется сейчас на площади 1,46 млрд. га, причем почти 0,2 млрд. га из них составляют орошаемые земли. Максимальная площадь возделывается в поясе развития черноземов и каштановых почв. В целом размеры пашни областей с засушливым и сухим климатом (0,80 млрд. га) несколько превосходят ее площадь (0,66 млрд. га) внутри территорий с достаточным увлажнением.

Антропогенные процессы

Земледелие в настоящее время ведется самыми различными орудиями: от примитивных ручных, используемых исключительно с помощью мускульной силы человека, до мощных тяжелых машин, под давлением колес которых существенно меняются физические свойства почвенного покрова.

В различных географических условиях сельскохозяйственные работы проводятся по-разному. Специфика обработки полей зависит и от уровня экономического развития той или иной страны, а масштабы эксплуатации земли — также и от численности населения и государственного устройства. Отсюда вытекает, что процессы-следствия (антропогенные и природно-антропогенные) определенным образом отличаются в зависимости от фона, на котором они возникают, и от интенсивности антропогенного воздействия.

Примитивное земледелие

Так можно назвать земледелие, все еще осуществляемое на больших площадях во многих развивающихся странах. Его принято называть подсечным [21]. Подсечная форма земледелия почти не распространена в умеренном поясе. Существование в тропиках обширных лесных пространств и сравнительно эф-

фактивные затраты труда в условиях отсталой экономики способствовали быстрому распространению и «живучести» подсечного земледелия, которое и поныне остается основной формой земледельческого использования угодий в странах «третьего мира». Это в особенности относится к Африке и в некоторой степени к Латинской Америке и Юго-Восточной Азии. В середине 70-х годов подсечное земледелие практиковалось на площади в 36 млн. га и давало продукцию для 200 млн. людей.

Подсечная система основывается на использовании культурными растениями питательных веществ, освобождающихся при сгнивании или сжигании деревьев. Подсечная система, при которой поваленные деревья сжигаются, именуется подсечно-огневой, а при которой гнивают — подсечно-переложной. Обе достаточно сходны, поэтому рассмотрим в качестве примера лишь первую.

На выбранных для посева участках вырубают лес и в сухой сезон сжигают, чтобы мусонные дожди смыли золу в почву. Семена высаживаются в начале дождей, причем на одном поле одновременно выращивают до 35 различных культур (соответственно потребностям и с целью страхования от неурожая). Все работы производятся вручную архаичными орудиями: длинными ножами, палками-копалками и мотыгами. После посева никакой обработки поля не производится и его посещают лишь для сбора урожая. Через год-два почва истощается, участок забрасывается на ряд лет, а вместо него обезлесивается и обрабатывается новый.

При рассмотренном способе земледелия имеют место следующие мероприятия: 1) валка леса, 2) сжигание, 3) обработка почвы и ее засев, 4) отчуждение продукции с урожаем («вынос с урожаем»).

Изменение почвы при применении подсечно-огневой системы сводится в первую очередь к уменьшению вязкости и уплотненности верхних горизонтов. При этом бурно осуществляются природно-антропогенные процессы, такие как окисление почвенного гумуса, эрозия почв и их оползание [21].

Современное земледелие

Системы мероприятий, направленных на получение высоких урожаев с возделываемых земель, могут несколько отличаться в зависимости от почвенно-климатических и геоморфологических условий местности. К наиболее важным и общим мероприятиям принадлежат: 1) специальные периодические или единовременные мелиорации, 2) механическая обработка почвы и засев ее, 3) рассеивание удобрений и пестицидов, 4) полив орошаемых земель, 5) отчуждение продукции с урожаем.

Вспашка и обработка полей — это, по-видимому, самый грандиозный антропогенный процесс по количеству вовлекае-

мого в перемещение материала земной коры. М. И. Хазанов [40], приняв среднюю глубину обработки пашни 25 см, подсчитал, что ежегодной перепахкой полей человечество переворачивает около 4000 км³ земли, т. е. не менее 4 трлн. т.

Изменение почвенного профиля. Согласно Б. П. Ахтырцеву, обработка приводит к нарушению строения профиля почвы особенно с малой мощностью генетических горизонтов (подзолистых, серых лесных и др.). Верхние горизонты делаются однородными, меняется состав гумуса, разрушается структура, ухудшаются физические свойства, усиливается аэрация пахотного горизонта, ускоряется вымывание и выдувание тонких частиц из него. В результате длительной обработки верхние горизонты подвергаются выпахиванию. Они теряют значительное количество перегноя, азота, фосфора, калия, поглощенных оснований; в них повышается величина гидролитической кислотности и снижается степень насыщенности основаниями. Кроме того, часть глинистых частиц и гумуса вымывается в подпахотный слой, коагулирует его поры, вследствие чего образуется уплотненная плужная подошва. Наблюдается постепенное изменение водного режима распаханых почв.

Уменьшение плотности почвы и ее уплотнение. Эти противоположные явления отмечаются при культивации полей современными методами. Уменьшение плотности представляет собой результат различных видов вспашки, в том числе глубокой. Однако применение для этой цели тяжелых машин в последнее время приводит к тому, что наряду с разрыхленной на полях возникают полосы значительно уплотненной почвы. Показательно в этом отношении данные исследований на полях с пропашными культурами в штате Миннесота (США). Для наблюдений использовались тракторы массой от 3,7 до 7,5 т. При проведении всех полевых работ, кроме пахоты, тракторы двигались по одним и тем же колеям. Исследования показали, что плотность почвы в междурядьях, по которым проходили колеса, к осени увеличивается в слоях 0—15 и 15—30 см на 20 и 10 % соответственно. В результате зимнего промораживания к весне утрамбованная колесами почва разуплотнялась на 50 % в слое 0—7 см и менее чем на 25 % в слое 0—30 см. При осенней вспашке сочетание механического и морозного рыхлений разуплотняло почву на 90 %. Для придания оптимальной структуры почве в уплотненных междурядьях требуется больше предпосевных обработок по сравнению с контролем. В измененной давлением колес почве уменьшался или полностью прекращался рост корней в 60 % объема слоя 0—30 см и на 40 % уменьшалось образование клубеньков на корнях сои.

Мелиорация земель — это их улучшение. Хотя возделывание сельскохозяйственных культур осуществляется на различных землях, человек всегда стремился отвести для этой цели лучшие из имевшихся в его распоряжении. Тем не менее полу-

чение устойчивых урожаев осуществляется, как правило, с помощью мелиорации земель.

Мелиорированными являются орошаемые или осушенные территории, а также все площади, на которых применяются различного рода защитные мероприятия от ускоренной денудации и аккумуляции, а также некоторых других неблагоприятных последствий. Мелиоративные мероприятия осуществляются не только применительно к пахотным землям, но затрагивают и другие их типы.

М. И. Хазанов подсчитал, что объем земляных работ при создании орошаемых полей оказывается весьма велик. Создание магистральных и распределительных каналов, насосных станций, ЛЭП, трансформаторных подстанций, коллекторно-дренажной сети и планировка орошаемых земель — все это в различных природных условиях требует выемки и перемещения грунтов в количестве от 250 до 1350 м³ в расчете на 1 га. К 1965 г. при создании оросительных систем были произведены земляные работы общим объемом 144 км³. Еще 14,5 км³ должно было быть перемещено в период 1966—1980 гг. Объемы земляных работ при орошении и осушении в целом по миру и для СССР выражаются, согласно данным М. И. Хазанова, следующими цифрами (в км³).

	Орошение		Осушение	
	в мире	в СССР	в мире	в СССР
До 1966 г.	144	9,5	22	5
1966—1980 гг. . .	14,5	3,2	4,5	2,3

Основная часть этих работ связана с необходимостью увеличения земледельческих площадей.

В СССР масштабы мелиоративных работ быстро растут. Экономически выгодно наибольшие капиталовложения производить в водохозяйственное и мелиоративное строительство в районах с хорошей водообеспеченностью. Таким районом становится Нечерноземная зона РСФСР. В ней предстоит осушить 9—10 млн. га земель, оросить 2—2,5 млн. га и провести культурно-технические мероприятия на площади 8—10 млн. га.

Мелиоративные мероприятия, направленные на предотвращение или хотя бы ослабление ускоренной эрозии и дефляции на богарных пахотных угодьях, могут быть чисто инженерными (например, террасирование, заравнивание оврагов и др.), фитомелиоративными (высаживание защитных культур и др.), смешанными — инженерно-биологическими. В ряде случаев такие мероприятия являются агротехническими, будучи заложены в структуре проведения обычных полевых работ. Таковы контурная вспашка, безотвальная обработка, дозированное (в зависимости от подверженности эрозии) внесение удобрений в почву и др.

В СССР ведутся работы по комплексному решению защиты почв от эрозии и дефляции применительно к конкретным

географическим и экономическим условиям различных районов. Так, в Алтайском крае, согласно А. Н. Каштанову, внедрен следующий комплекс мероприятий: 1) почвозащитные севообороты; 2) плоскорезная и контурная обработки, поделка валков и лунок, посев по горизонталям и поперек склона; 3) применение на эродированных почвах повышенных доз органических и минеральных удобрений; 4) облесение и залуживание балок и оврагов; 5) водохозяйственное и гидротехническое строительство с целью обводнения и орошения отдельных территорий.

Специфическими являются мероприятия по защите осушенных торфяно-болотных почв от дефляции. В Белорусском Полесье, как указывают Л. М. Ярошевич и Л. С. Микулович, среди осушенных торфяно-болотных почв маломощные торфяники (с мощностью торфяной залежи менее 1 м) характеризуются наименьшей устойчивостью против дефляции. Эти земли отводятся под почвозащитные севообороты с посевом многолетних трав длительного пользования (четыре поля многолетних трав и два зерновых). Возделывание пропашных культур на них исключается. Эффективность почвозащитных севооборотов на дефлированных землях повышается при посеве промежуточных культур, которые не только надежно защищают почву от разрушительного действия ветра, но и являются дополнительным источником кормов.

На осушенных дефляционноопасных торфяно-болотных почвах при посеве яровых зерновых перекрестным способом в ранние сроки количество снесенной почвы уменьшается в 2—3 раза. Одним из эффективных приемов защиты почв от дефляции в весенний период является прикатывание яровых зерновых культур кольчато-зубчатыми катками, создающими шероховатую поверхность. Сдувание торфа здесь практически отсутствует. На контрольных участках, где послепосевное прикатывание зерновых проводилось гладкими катками, общее количество торфа, удаленного за 5 лет (1971—1975 гг.), составило 22,9—35,0 т/га. Защита осушенных торфяно-болотных почв от дефляции более эффективна при наличии полевых защитных полос.

Наиболее сложной является защита почв от эрозии и дефляции в горных и предгорных районах.

Проблемной лабораторией эрозии почв и русловых процессов МГУ под руководством профессора Н. И. Маккавеева разработаны генеральные схемы противоэрозионных мероприятий для трех административных подразделений РСФСР, расположенных на Северном Кавказе — Кабардино-Балкарской АССР, Карачаево-Черкесской автономной области и Дагестанской АССР. В генеральных схемах большое внимание уделяется агротехническим и фитомелиоративным мероприятиям. К ним относятся: 1) безотвальная обработка почв с сохранением стерни, 2) посев противоэрозионными сеялками, 3) полосное

размещение культур, 4) посев кулис на зяби, 5) контурная вспашка и вспашка поперек склона. Эти мероприятия не требуют больших капитальных вложений и дают быстрый противоэрозионный и экономический эффект. Главная роль в борьбе с ускоренной дефляцией, которой подвержены Кабардино-Балкария и особенно Карачаево-Черкессия, отведена полезащитным лесным полосам. В Кабардино-Балкарии проведено террасирование крутых склонов под сады и виноградники. Для горных и предгорных районов предусмотрены гидротехнические меры по борьбе с оврагами и селями. Оба примера показывают, что противоэрозионные и противодефляционные мероприятия в нашей стране проводятся на основе целенаправленных научных исследований, учитывающих достижения сельскохозяйственных наук у нас в стране и за рубежом.

Вот, например, какие меры для этих же целей применяются в США: 1) контурная обработка земли, при которой борозды для посадки культур прокладываются строго перпендикулярно уклону местности, следуя неровностям рельефа. Этот прием весьма эффективен в районах с недостаточным увлажнением; 2) полосное расположение посевов. Полосы имеют одинаковую ширину, кратную захвату основных сельскохозяйственных орудий и попеременно засеиваются многолетними травами или заменяющими их культурами густого сева и пропашными культурами, возделывание которых всегда вызывает значительную эрозию почв; 3) террасирование склонов, иногда сопровождаемое дренажом террас. Расстояние между террасами выбирается кратным захвату основными сельскохозяйственными машинами. При террасировании и контурной обработке почв потери от эрозии уменьшились на 85 %.

Кроме того, американскими фермерами все шире применяется обработка почвы с оставлением мульчи. Этот метод оказывается весьма эффективным в районах, подверженных ускоренной дефляции.

Производится также залужение сильно эродированных участков многолетними травами, сочетаемое с устройством водоудерживающих и водоотводящих террас. Залужение осуществляется и в самих водоотводящих ложбинах и канавах. Лесные насаждения и полосы создаются только на землях, не пригодных для сельского хозяйства — сильно эродированных крутых склонах, в оврагах и на каменистых землях. Раньше полезащитные лесные полосы высаживались в районах пыльных бурь, но в связи с разработкой приема мульчирования необходимость в них отпала. Иногда применяется заравнивание оврагов.

Большой эффект в борьбе одновременно с эрозией и дефляцией получен в результате применения минимальной обработки почвы, при которой семена важнейших сельскохозяйственных культур вносятся в нее при наличии защищающего почву покрова из специально для этого посаженных культур или стеблей

от культур предыдущего урожая. В штатах Техас и Оклахома минимальная обработка почвы применяется на площади 1,4 млн. га и здесь потери от ускоренной эрозии и дефляции сократились на 75—95 %.

Рассеивание удобрений и пестицидов. С целью поддержания плодородия почвы и получения высоких урожаев на полях ежегодно рассеиваются сотни миллионов тонн органических и минеральных удобрений. Особенно велико значение минеральных удобрений, мировое потребление которых возросло за последние 20 лет с 24 до 88 млн. т. В СССР за годы Советской власти внесение питательных веществ в почву в форме удобрений возросло в 19 раз и сейчас, согласно С. Г. Скоропанову, оно достигло хорошего уровня: более 100 кг азота, фосфора и калия на 1 га пахотных земель. Ныне вынос питательных веществ с урожаем компенсируется вносимыми удобрениями полностью по фосфору, почти на 90 % по азоту и на 60 % по калию.

Большое внимание уделено увеличению продуктивности пашни в нечерноземных районах.

Просто и экономично, как указывают В. А. Белов и А. А. Широков, решена проблема коренного улучшения бросовых и малопродуктивных земель в Нечерноземной зоне РСФСР путем намыва на них сапропелей. Запасы последних в этой зоне оценены в 10 млрд. м³. Сапрпель землесосным снарядом по напорному трубопроводу подается на поле. В пределах последнего нарезаются борозды параллельно трубопроводу поперек уклона местности. Высота борозд и расстояние между ними выбираются в зависимости от необходимой дозы внесения сапропеля и уклона местности и устанавливаются расчетом. Сапрпельная пульпа, выливаясь из напорного трубопровода, растекается по близлежащей борозде, полностью заполняет ее и, переливаясь без сосредоточенных, неразрушающих почву потоков через гребень борозды, растекается и наполняет следующую борозду и т. д. В Ярославской области сапрпель из оз. Неро намывался на дерново-подзолистые почвы в количестве 800 т/га (в пересчете на 60 % влажности). Тем самым почвы приобретали дополнительно большие количества питательных веществ — около 6,5 т/га валового азота, 1,4 т/га калия, 1,1 т/га фосфора и 150 т/га кальция. У улучшенных таким способом почв зафиксировано значительное увеличение продуктивности.

Особый интерес представляют данные о внесении азотных удобрений, поскольку потеря азота почвой при выносе с урожаем и ряде других процессов ведет к уменьшению содержания гумуса в ней. Б. П. Ахтырцев подсчитал, что в умеренном поясе на неудобряемых полях в среднем теряется 0,37 т/га·год гумуса (в пересчете на углерод). В то же время внесение навоза в дозе свыше 6 т/га·год ведет к постепенному увеличению запасов гумуса.

Р. Янг и Р. Хольт на экспериментальных полях севера США (штат Миннесота) установили, что зимнее внесение навоза в количестве 0,9—1,3 т/га на мерзлую пашню оказывает существенное противодействие эрозии почвы, снижает потери ею биогенных элементов, в первую очередь — азота.

До появления искусственных азотных удобрений со всеми удобрениями в СССР почвам возвращалось лишь 26 % того, что выносилось с урожаем. Поэтому запасы азота, а следовательно, и гумуса в почвенном покрове истощались. Под влиянием систематического применения «синтетического азота» земледелие СССР почти достигло его положительного баланса.

В СССР и других развитых странах внесение азотных удобрений на поля выражается в цифрах, сопоставимых с темпами некоторых природных процессов, причем масштабы этого мероприятия растут, хотя оно нередко ставит под угрозу чистоту подземных и поверхностных вод. При неконтролируемом избыточном внесении в почву азотных удобрений возможны отравления получаемыми с таких полей пищевыми продуктами.

О масштабах применения азотных удобрений свидетельствуют следующие данные. Так, в Нидерландах в середине 60-х годов их рассеивалось 124 кг на 1 га, а в начале 70-х годов уже 175 кг. Средние показатели применения азотных удобрений в других странах Западной Европы для начала 70-х годов колебались от 25 (Ирландия) до 113 кг/га (Дания). Всего в мире в это время использовалось немногим более 30 млн. т азотных удобрений, а в конце 70-х годов уже более 40 млн. т. Столько же азота (около 40 млн. т) фиксируется в почвах высаживаемыми для этой цели бобовыми культурами.

По данным International Journal Environment Studies, к 1983 г. ожидается значительное увеличение производства и применения удобрений в развивающихся странах, в частности их продукция азотных и фосфорных удобрений должна составить 20 % от общемировой. Однако пока эти страны характеризуются низкими показателями использования удобрений, хотя прогресс в этом отношении за последнее время очевиден (табл. 5).

Таблица 5

Использование удобрений в Африке, Латинской Америке и некоторых регионах Азии (кг/га)

Регион	1961— 1965 гг.	1975 г.	Регион	1961— 1965 гг.	1975 г.
Африка	1,7	5,6	Страны Азии с планируемой экономикой Развивающиеся страны Развитые страны	13,4	49,7
Латинская Америка	10,6	31,9		5,7	19,6
Ближний Восток	6,6	24,7		66,9	100,4
Дальний Восток	5,7	21,2			

Получение высоких урожаев в настоящее время невозможно без применения пестицидов, свыше 4 млн. т которых ежегодно рассеивается на полях. Однако в последнее время все больше видов вредителей оказываются устойчивыми к применяемым в сельском хозяйстве ядовитым веществам. Накапливаясь в почвах, пестициды могут менять их свойства. Они убивают почвенные микроорганизмы и дождевых червей, имеющих огромное значение в сохранении плодородия почв.

Пестициды могут мигрировать на большие расстояния и воздействовать на самые различные экосистемы. В настоящее время хлорорганические соединения, отличающиеся самой высокой устойчивостью, обнаруживаются в ничтожных концентрациях повсеместно в поверхностных водах, современных донных осадках и организмах.

Полив орошаемых земель. В настоящее время площадь орошаемых земледельческих угодий в мире приближается к 14 % от общей площади пашни. Продукция орошаемых земель превышает 50 % мировой продукции сельского хозяйства. В СССР площадь орошаемых земель достигла 16,0, а в США 17,2 млн. га (данные ФАО).

Хотя орошение земель ведется главным образом в условиях засушливого климата при суммах осадков в 250—500 мм и менее, в районах с муссонным климатом оно применяется при очень высоких суммах осадков (выше 700 мм и даже при 1000—1500 мм), потому что там наблюдаются длительные сухие периоды.

Ограничивающим фактором орошаемого земледелия являются большие уклоны местности. Лишь при незначительной крутизне поверхностей возможно сооружение ирригационных систем, каналов и распределительной сети, подача воды на поля и главным образом равномерность увлажнения.

Величина допустимых уклонов колеблется в зависимости от применяемого способа орошения. Наиболее часто практикуются затопление и бороздковый полив. Первое возможно лишь на хорошо спланированных полях с ничтожными уклонами. Бороздковый полив допускается и при уклонах в 1—2°. Дождевание практически возможно на склонах любой крутизны, однако из-за развития эрозии оно применяется на полях с уклонами не выше 5—10° [21].

Агроирригационное использование земель вызывает целую цепь антропогенных процессов-следствий. Главными из них являются: 1) «ирригационная эрозия», 2) аккумуляция агроирригационного культурного горизонта почв, 3) вторичное засоление и заболачивание грунтов, 4) загрязнение поверхностных и подземных вод, 5) опускание уровня подземных вод при избыточном их заборе на орошение, 6) обмеление и прекращение существования рек, 7) оседание местности.

«Ирригационная эрозия» является антропогенным процессом-следствием, потому что возникает в результате действия водных капель и струй, поступающих из инженерных сооружений и установок. И. Ф. Аристов, изучивший проявление ирригационной эрозии в Киргизии, считает, что ее основные причины: 1) чрезмерные уклоны полей, колеблющиеся в интервале от $0^{\circ}28'$ до 5° ; 2) несоблюдение правил и техники полива; 3) применение примитивных методов полива (диким напуском и по бороздам с затоплением гребней борозд); 4) размещение временных оросительных сетей без учета рельефа; 5) плохая планировка полей; 6) вспашка вдоль склонов; 7) неполное освоение севооборотов; 8) распыление структуры почвы многократными обработками.

Многолетние стационарные исследования показали, что эрозия светло-коричневых сероземных и староорошаемых почв в Ферганской долине (Ошская область) достигает значительных величин. Модуль смыва почвы с хлопковых полей колеблется в интервале 25—75 т/га·год, с полей с зерновыми — в интервале 15—35 и с угодий с многолетними травами — в интервале 5—10 т/га·год. В Чуйской долине, на плантациях сахарной свеклы, смыв варьирует от 22 до 50 т/га·год, на полях с зерновыми — от 15 до 25 и на участках с люцерной — от 5 до 8 т/га·год.

На предгорных шлейфах Алайского, Ферганского и Чаткальского хребтов Южной Киргизии, как указывает И. Ф. Аристов, орошаемые земли смыты до каменисто-галечных отложений.

Ценное исследование по установлению масштабов ирригационной эрозии и ущерба от нее осуществил Е. С. Акопов применительно к орошаемым землям Армянской ССР. Им установлено, что ежегодно поверхностному смыву при поливах в республике подвергается 132,3 тыс. га. Модуль смыва варьирует от 9,8 до 27,1 т/га·год, а средняя его величина равна 24,7 т/га·год. Общее количество ежегодно удаляемой почвы 3271,9 тыс. т. Получив эту цифру и зная среднее количество почвы (4840 т) на каждом гектаре орошаемых угодий, Е. С. Акопов установил, что ежегодный ущерб от ирригационной эрозии в Армении эквивалентен потере их площади в 720,7 га.

Х. М. Ахмадов изучил масштабы овражной ирригационной эрозии в одном из наиболее эрозионноопасных районов Средней Азии. Вдоль рек Вахш и Сурхоб в пределах Комсомолабадского и Гарманского районов расположен один из массивов крупного роста оврагов. В окрестностях поселков Гарм и Комсомолабад среднегодовой прирост оврагов составляет более 10 м. В результате несоблюдения техники поливов за один вегетационный период некоторые овраги выросли на сотни метров. Так, в Комсомолабадском районе один овраг вырос на 320 м, другой на 172 м. В 1974 г. в двух километрах восточнее поселка Комсомолабад зарегистрирован один овраг, который вырос за день

на 274 м, а в конце вегетационного периода прирост его составил 372 м.

По мнению Н. Е. Кузьманенко, при существующих способах техники полива ирригационная эрозия является серьезной угрозой орошаемым землям юга европейской части СССР всюду, где они имеют уклон в 14' и более.

Для орошаемого земледелия США характерно широкое применение способов поверхностного полива, способствующих эрозионному смыву и другим неблагоприятным изменениям почв. В наибольшей мере это связано с распределением воды из открытых оросительных каналов. Так орошается немногим более половины площади поливных земель страны (штаты Нью-Мексико, Юта, Аризона, Калифорния, Орегон, Айдахо). Даже при небольшом поверхностном стоке при орошении по бороздам в верхней части полей происходит размыв, а в нижней — аккумуляция почвы, особенно значительные при поливе почв со значительной водопроницаемостью, требующих высоких оросительных норм.

Наиболее велики скорости эрозии на орошаемых почвах высоких лёссовых равнин р. Снейк и бассейна р. Колумбия. Например, в штате Айдахо эрозионный снос достигает 25 т/га·год даже при уклоне местности немногим более 35'. А в штате Юта при изменении угла наклона орошаемых иловато-суглинистых почв от менее чем 35' до 1°45' эрозионный снос возрастает в 20 раз. В то же время при соответствующем уровне агротехники некоторые типы почв могут орошаться при углах наклона 1°10'—3°30' (на Великих равнинах) и до 8°30'—11°20' в предгорьях Сьерра-Невады (без существенного ущерба почвам). В последние годы практически во всех штатах, прежде всего в центральной части Великих равнин, значительно выросли площади земель, орошаемых дождеванием. Однако и таким землям свойственна эрозия и дефляция. Так, в Небраске примерно $\frac{3}{4}$ из орошаемых дождеванием 0,8 млн. га земель с полого-волнистым рельефом и песчаными почвами нарушены этими процессами.

В целом количество обломочного материала, поступающего в водотоки в результате ирригационной эрозии, по данным американских специалистов, составляет 5% от общей величины твердого стока в США, однако ущерб от нее орошаемым угодьям очень значителен.

В настоящее время примерно на 11% орошаемой площади необходимо проведение почвозащитных мероприятий, изменение методов полива или агротехнических приемов; 40% площади нуждаются в усовершенствовании оросительных систем. До сих пор ирригационная эрозия значительна на орошаемых массивах штатов Вашингтон, Айдахо, Юта, Миссури, где орошаются либо лёссовые, либо пылеватые тяжелосуглинистые почвы.

Аккумуляция нового агроирригационного перегнойного горизонта почвы происходит под влиянием орошения в оазисах [21]. В оазисных почвах четко выделяется верхний антропогенный горизонт мощностью от 0,2 до нескольких метров, под которым захоронена естественная почва. Скорость формирования антропогенного горизонта обычно около 1 мм в год. Он возникает при осадении наносов из оросительных вод, а также в результате внесения органических и землистых удобрений и имеет суглинистый или тяжелосуглинистый механический состав, однороден, сильно переработан червями, насекомыми и корнями культурных растений.

Вторичное засоление почв. Как правило, оно связано с высоким подъемом минерализованных грунтовых вод до критической глубины порядка 2—3 м от поверхности земли. Причина такого подъема уровня грунтовых вод кроется в нарушении водного баланса территории фильтрационными водами оросительной сети и орошаемых полей. Этот процесс распространяется также и на прилегающие неорошаемые площади. Грунтовые воды, содержащие соли, начинают при этом интенсивно испаряться с поверхности, постепенно насыщая почву избыточным количеством солей.

Наиболее типичными ионами засоленных почв являются Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- . В результате концентрация солей в почвенном растворе может оказаться в 50—100 раз больше, чем в оросительной воде. В наибольшей степени опасность засоления существует в районах со слабо расчлененным рельефом, плохим дренажом и близким к поверхности залеганием уровня грунтовых вод. Чем засушливее климат, тем вероятнее реализация этой опасности.

На степень и характер засоления влияют особенности применяемого ирригационного режима (способ и режим орошения), состав сельскохозяйственных культур, нормы полива и некоторые другие факторы. Наименьшее засоление наблюдается при дождевании, сильнее всего оно проявляется при бороздковом поливе. Эта зависимость была выявлена, в частности, при специальных исследованиях посевов сахарной свеклы и моркови в Восточном Средиземноморье (табл. 6).

Вторичное засоление почв — это настоящий бич орошаемого земледелия в аридных областях. По различным оценкам, от 30 до 80 % орошаемых полей в той или иной степени подвержены засолению и их продуктивность из-за этого снижена. В Ираке по этой причине выведена из строя $\frac{1}{3}$ орошаемых угодий, в Индии — $\frac{1}{6}$, в Пакистане — $\frac{1}{4}$, в Китае — $\frac{1}{5}$. К сожалению, это явление значительно развито и в нашей стране. Согласно Л. Г. Балаеву, по последним данным около 80 % орошаемых земель СССР засолены в той или иной степени исходно или вторично. По данным Исполкома ЮНЕП, ежегодно в мире из-за

Содержание растворимых солей в почве при различных способах орошения [21]

Глубина слоя, см	Содержание солей, %									
	При посеве	5 дней после посева			29—32 дня после посева			58—60 дней после посева		
		Способ орошения								
		бороздочный полив	загоплевие	дождевание	бороздочный полив	загоплевие	дождевание	бороздочный полив	загоплевие	дождевание
0—2	0,11	2,87	0,67	0,22	5,13	0,48	0,35	8,14	0,52	0,18
2—10	0,11	0,24	0,20	0,17	0,46	0,25	0,18	0,51	0,27	0,16
10—30	0,10	0,17	0,18	0,15	0,14	0,18	0,12	0,19	0,27	0,16
30—60	0,11	0,12	0,12	0,12	0,14	0,13	0,13	0,15	0,13	0,15
60—90	0,12	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12	0,13	0,19	0,17	0,14
90—120	0,15	0,15	0,14	0,15	0,19	0,18	0,17	0,19	0,15	0,17

засоления и заболачивания выходит из строя 0,2—0,3 млн. га возделываемых земель. Самыми крупными очагами вторичного засоления почв являются долины Хельмут в Афганистане, Мексикали в Мексике, бассейны рек Тигра и Евфрата в Сирии и Ираке, и долина Империл и бассейн р. Колорадо в США.

Вот некоторые подробности о вторичном засолении почв в США. Для большинства орошаемых земель США типичны в настоящее время достаточно благоприятные условия дренированности (естественной и искусственной) благодаря широкому применению вертикального и горизонтального дренажей. Но свойственное многим районам неэффективное использование влаги, низкий к. п. д. оросительных систем (до 33 % в бассейне р. Колорадо), а также применение воды повышенной минерализации привели к тому, что от 25 до 30 % орошаемых земель подвержены вторичному засолению. Наибольшие потери обрабатываемых земель в результате вторичного засоления связаны с периодом массового развития земледелия в первые десятилетия XX в. За 10 лет (с 1929 по 1939 г.) было заброшено свыше 400 тыс. га орошаемых земель. Самые крупные площади вторично засоленных земель расположены в дельтах рек Сан-Хоакин, в межгорных котловинах и речных долинах Большого Бассейна, в бассейне р. Колорадо и ее притоков, и р. Рио-Гранде.

Вторичное засоление особенно интенсивно в районах распространения тяжелых глинистых почв на древних озерных отложениях или на тонком стратифицированном аллювии пустынных и полупустынных областей в условиях орошения высоко

минерализованными водами. К таким районам относятся долины Империл, Коачелла, орошаемые участки долин рек Гумбольдт, Бэр, Рио-Гранде. Почвы этих долин обладают свойствами засоленных почв и благоприятный солевой баланс на них поддерживается по возможности искусственным путем. В ряде случаев это приводит к стабилизации площадей орошения (например, в долине Империл). В других районах засоление связано с подъемом засоленных грунтовых вод, что характерно, в частности, для 25 % орошаемых площадей долины р. Сан-Хоакин и для значительной части угодий в долине р. Солт-Ривер. В осевой части долины р. Сан-Хоакин преобладает сульфатный тип засоления, в бассейне р. Тулар на юге Большой Калифорнийской долины отмечаются содовый и частично боратный типы засоления. В бассейнах рек Грин-Ривер, Литл-Колорадо, Хила, а также в верховьях рек Арканзас и Саут-Платт распространен преимущественно сульфатный тип вторичного засоления, связанный с выходами слабовыветрелых морских осадочных отложений.

Загрязнение поверхностных и подземных вод. Это явление часто имеет место как в результате искусственного полива угодий, так и при использовании воды для рассоления почв. Промывки последних обычно осуществляются на фоне горизонтального и вертикального дренажей и отвода рассола, содержащего зачастую до 10—15 г/л солей, за пределы орошаемых полей. Очень часто при этом дренажные воды сбрасываются в реки, которые служат водосточниками для других оросительных систем и для водоснабжения. Это приводит к повышению минерализации речных вод, которые становятся непригодными не только для бытовых нужд, но и для орошения. От мероприятий по рассолению орошаемых земель страдают подземные воды.

Экологические проблемы, возникающие при проведении мероприятий по рассолению почв, очень сложны и их решение сейчас является весьма актуальным как для нашей страны, так и для ряда других государств.

Загрязнение подземных и поверхностных вод имеет место как результат использования их большого объема для полива в условиях применения минеральных удобрений. Например, в США, в бассейне р. Платт, в пределах штата Небраска, за последние 50 лет, по данным Дж. Аукоина, резко выросло содержание нитратов в подземных водах. По сведениям, собранным для 1700 скважин, оно колеблется от 0 до 200 мг/л. Почти всюду превышена ПДК для питьевой воды (10 мг/л). Концентрация нитратов растет в подземных водах в соответствии с ростом орошаемого земледелия и усилением агротехнических мероприятий.

Неоспоримые доказательства доминирующего влияния агроирригации на качество подземных вод были собраны в этом же

штате при исследованиях на вновь образованном массиве орошаемых земель провинции Холт. Здесь в подземных водах зафиксированы повышенные концентрации нитратов ионов кальция, магния, натрия, хлора и сульфат-иона именно на той площади, где количество орошаемых земель достигало максимума и составляло 80 % от их общей площади. На площадях интенсивной ирригации загрязнение подземных вод нитратами от неточечных источников возрастает со скоростью более 1 мг/л в год. Расчеты показывают, что около 50 % поступления соединений азота связано с глубокой инфильтрацией удобрений в водоносный горизонт. Природный азот почвы может также выщелачиваться из нее при интенсивном орошении и привноситься в подземные воды.

Проблема перенасыщения сульфатами также актуальна. Их концентрация выше 100 мг/л закономерна для подземных вод, забираемых из всех скважин в районе р. Платт. Существенно выше содержание сульфатов в подземных водах вблизи р. Саут-Платт, где речные воды используются для орошения настолько интенсивно, что часть их проходит через поле несколько раз. Концентрация сульфатов свыше 500 мг/л может сделать непригодной для ирригации воду из-за ее высокой солености в целом. Подобное явление уже создавало большие затруднения для фермеров в Калифорнии и долине р. Колорадо. Опасность быстрого засоления подземных вод очень реальна. В целом же экологические проблемы, связанные с расширяющейся ирригацией земель в Небраске, свойственны большинству территорий, где подземные воды используются для орошения полей.

Загрязнение поверхностных вод в районах орошаемого земледелия обусловлено в первую очередь наличием высококонцентрализованного возвратного стока с полей.

Понижение уровня подземных вод и истощение рек. Эти процессы имеют место не только при избыточном заборе подземных вод на орошение, но и в ряде других случаев, которые рассматриваются отдельно. Развитие орошаемого земледелия создает серьезную угрозу ресурсам поверхностных и подземных вод всюду, где это происходит за счет избыточного использования последних. Так, Дж. Аукоин считает, что увеличение площадей орошаемых угодий в Канзасе и Западной Небраске привело к тому, что уровень подземных вод на ряде площадей снизился на 18 м и более по сравнению с первоначальным. Вода выкачивается сейчас со скоростью, в 10 раз превышающей темпы естественного восстановления водоносности пласта. К 2000 г. понижение уровня подземных вод от исходного может достигнуть 52 м. Предполагается, что в этом случае три главных притока р. Саут-Платт высохнут уже к 1992 г., если развитие ирригации не приостановится. Число скважин ежегодно возрастает на 200 в год.

Эксперты предсказывают, что через 30—35 лет р. Платт, являющаяся артерией жизни для водной фауны, исчезнет и одновременно произойдет полное истощение подземных вод, если существующие темпы развития ирригации сохранятся.

Оседание поверхности. Это явление широко распространено там, где из слабо литифицированных горных пород осуществляется избыточная откачка подземных вод и происходит понижение их уровня. Отрицательные движения земной поверхности обуславливаются тем, что при откачке воды давление в напорном горизонте уменьшается, и под весом вышележащих пород обезвоженный пласт несколько сжимается. При этом, как указывает М. С. Успенский, на границе с таким пластом наблюдается отток влаги из пор кровли и подошвы маловодопроницаемых толщ, что тоже приводит к их уплотнению. Правда, последнее идет медленно — десятки, сотни, а иногда и тысячи лет, тогда как сжатие обезвоженного пласта осуществляется очень быстро. При прекращении изъятия воды или ее возвратной закачке может происходить медленное воздымание опустившейся поверхности. Так, в Японии в районе Кавасаки в течение 10 лет производился избыточный отбор подземных вод, в результате чего в ряде мест возникли мульды оседания. После того как забор воды был ограничен, уровень грунтовых вод не только стабилизировался, но и стал подниматься, начали выравниваться зоны оседания, в пределах которых только за 1974 г. произошло поднятие в среднем на 2 см.

Наиболее хорошо оседания земной поверхности при избыточном заборе воды на орошение изучены в США. Б. Лофгрэн сообщает, что в округе Арвин-Марикона (штат Калифорния) на площади 300 тыс. га развито орошаемое земледелие. Подземные воды для него откачиваются из 2300 скважин глубиной от 100 до 300 м, что обеспечивает $\frac{2}{3}$ всего ирригационного водопотребления. Откачка ведется с 1926 г. В 1930 г. было выкачено 0,04, в 1965 — 0,9, а в 1970 — 1,2 км³ воды. За период 1926—1970 гг. опускание земной поверхности в округе составило в среднем 3 м. Уменьшение объема поверхностной части земной коры в результате этого достигло 1,23 км³. Однако в целом масштабы отрицательных движений в этом районе быстро растут, согласуясь с увеличением водозабора. Например, в 1972 г. на площади в 1120 га средняя величина осадки составила 0,3 м, а отдельные провалы достигали 9 м. Наблюдения показали, что на каждый метр понижения уровня подземных вод земная поверхность оседала на 0,1—1,0 см.

Р. Дэни приводит сведения об оседании земной поверхности в долинах рек Солт-Ривер и Санта-Крус-Ривер на площадях развития орошаемого земледелия (штат Аризона) и описывает сопровождающие их трещины-разрывы и округлые ямы-провалы, трассирующиеся на продолжении линий таких разрывов. Разрывные дислокации образовались в аллювиальных отложениях

вблизи площадей наибольшего понижения уровня подземных вод. Они ориентированы либо субпараллельно расположенным поблизости горным хребтам, либо субперпендикулярно к ним, а на большом удалении от хребтов ориентировка разрывов выглядит более хаотичной. Разрывы сначала возникают или в виде линейных скоплений небольших трещин около 2—2,5 м шириной и 1—2 м длиной каждая, или первоначально являются прямолинейные цепочки из отдельных ямок-колодцев, напоминающих норы грызунов. После ливня происходит слияние отрицательных форм и оформляются крутостенные, похожие на промоины, трещины-разрывы. Они могут простираться на 100—200 м. Находящиеся на их продолжении ямы-колодцы иногда достигают 18 м в глубину. При дальнейшей эрозии стенки трещин обрушиваются, в результате чего расстояние между ними может возрасти до 8 м.

Первоначально большинство трещин не имеет явных признаков вертикального смещения разделяемых ими блоков пород. Однако длительно существующие крупные трещины представляют собой антропогенные сбросы. Крупный разрыв около хребта Пикахо длиной почти 13 км разделяет блоки с амплитудой смещения одного относительно другого в 0,5 м. Блок, отделенный разрывом от хребта, опущен. Образование разрывов, в том числе разрывов-сбросов, приводит к разрушению различных конструкций, в первую очередь линейных сооружений: каналов, дорог и т. п. (рис. 3).

М. С. Успенский обобщил данные об оседании земной поверхности на сельских и городских землях (табл. 7). Заканчивая рассмотрение данных об оседании земной поверхности под воздействием избыточной откачки вод для нужд орошаемого земледелия, можно отметить, что масштабы этого процесса растут. Увеличиваются территории, подвергающиеся оседанию и растут его скорости.

«Вынос с урожаем» является важнейшим антропогенным мероприятием, оказывающим серьезное воздействие на состояние почвенного покрова возделываемых земель. Т. И. Евдокимова и соавторы произвели расчет поступления и выноса биогенных элементов в различных природных зонах европейской части СССР. Наиболее подробный расчет сделан ими для лесной зоны (табл. 8).

Данные табл. 8 показывают, что баланс большинства биогенных элементов на пашне лесной зоны европейской части СССР был отрицательным в конце 60-х—начале 70-х годов. Приведенные данные важны также для понимания динамики почвенного покрова в условиях земледельческого использования. Оказывается, что вынос с урожаем приводит к азотному истощению почвы сильнее, чем удаление соединений азота с поверхностным и подземным стоками. Таким образом, как следует из данного примера, состояние умеренно эродируемых почв на

полях больше зависит от таких антропогенных процессов как рассеивание удобрений и изъятие продукции, чем от механического и химического выносов их вещества вследствие проявления природно-антропогенных процессов.

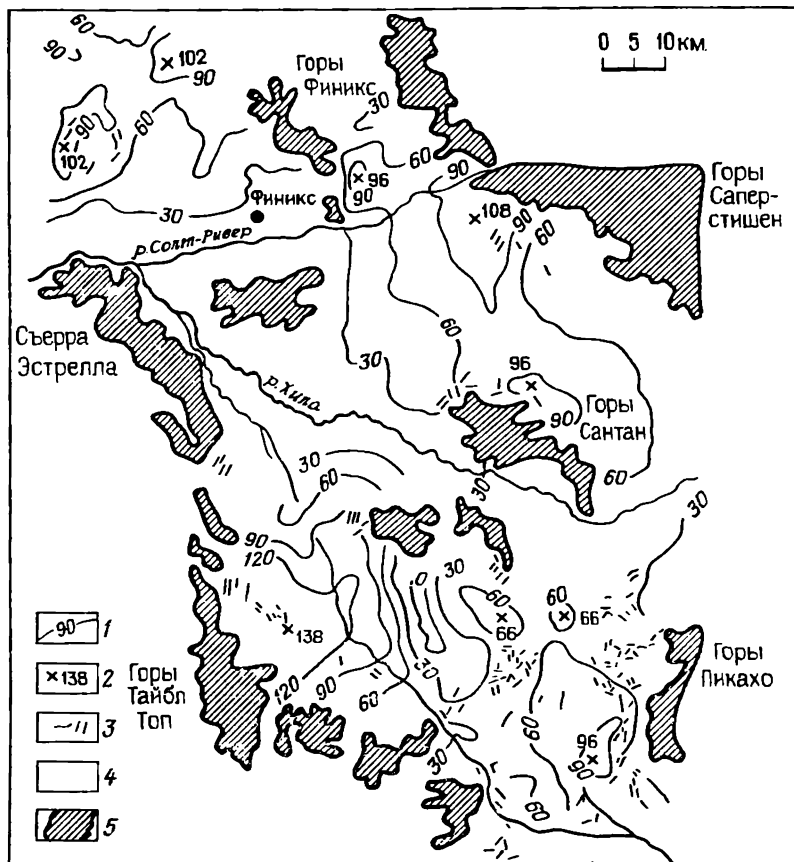


Рис. 3. Схема понижения уровня подземных вод за 1923—1972 гг. и вызванных оседанием земной поверхности разрывных нарушений на юге штата Аризона (США):

1 — изолинии понижения уровня подземных вод, м; 2 — отметки центров депрессионных воронок; 3 — разрывные нарушения; 4 — площадь распространения рыхлых и слабоцементированных осадочных пород; 5 — площадь распространения кристаллических пород (по Р. Лэни, 1976 г.)

Масштабы ежегодного среднего выноса питательных веществ с урожаем пшеницы, картофеля и люцерны оценены П. Дювиньо и М. Тангом (в кг/га·год).

Культуры	N	P	K	Ca
Пшеница	70	30	50	30
Картофель	90	40	160	76
Люцерна	—	—	—	242

Таблица 7

Масштабы и скорость оседания земной поверхности в результате избыточного забора подземных вод и других флюидов (по М. С. Успенскому с дополнениями)

Местоположение района оседания	Глубина залегания уплотняющихся слоев, м	Наибольшее оседание земной поверхности, м	Скорость оседания, см/год	Период наблюдений, гг.
Осака, Япония	10—400	3,1	7,7	1928—1968
Токио, Япония	10—300	4,3	8,6	1920—1970
Мехико, Мексика	10—50	8,5	26,6	1935—1970
Тайбей, Тайвань	10—250	1,3	16,3	1961—1969
Аризона, США	90—550	2,3	12,1	1948—1967
Долина р. Санта-Клара, Калифорния, США	55—300	4,0	8,0	1920—1970
Долина р. Сан-Хоакин, там же	60—920	2,8—8,5	8,0—24,3	1935—1970
Ланкастер, там же	60—300	0,9	7,5	1955—1967
Лас-Вегас, Невада, США	60—300	0,9	3,2	1935—1963
Хьюстон, Галвестон, Техас, США	6—600	0,9—1,5	4,3—7,1	1943—1964
Батон-Руж, Луизиана, США	50—600	0,3	1,0	1934—1965
Арвин Марикона, Калифорния, США	100—300	3,0	7	1926—1970

Таблица 8

Баланс химических элементов на пашне лесной зоны европейской части СССР (кг/га·год)

Статьи баланса	Элементы					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Приход:						
с атмосферными осадками	4,0	0,15	5,0	7,0	2,0	12,0
с удобрениями	20,0	6,0	15,0	400	15,0	10,0
Всего	24,0	6,15	20,0	407	17,0	22,0
Расход:						
с отчуждением урожая	100	18,0	90,0	30,0	13,0	6,0
с поверхностным стоком	20	1,7	127,0	110,0	23,0	9,0
с подземным стоком	1,8	0,05	10,0	140,0	7,0	7,0
Всего	121,8	19,75	227,0	280,0	43,0	22,0
Баланс	-97,8	-13,60	-207,0	+127,0	-26,0	0

В настоящее время серьезному истощению из-за выноса с урожаем подвергаются почвы во многих развивающихся странах. Об этом свидетельствуют низкие дозы внесенных удобрений в них по сравнению с развитыми странами (см. табл. 5).

Природно-антропогенные процессы

Пахотные земли издавна подвергаются ускоренной денудации, темпы которой бывают столь высоки, что они выглядят огромными по сравнению с масштабами природного сноса. Ускоренная денудация наносит огромный ущерб, ухудшая состояние почвенного покрова пахотных земель и одновременно поставляя в водные и воздушные потоки большие количества загрязняющих их твердых частиц. Немалой бедой является и ускоренная аккумуляция грубых наносов на землях, расположенных в долинах.

Наряду с механическим сносом и разрушением пахотных земель происходит усиление химических процессов, ведущих к дополнительному изъятию вещества земной коры с них. Такими процессами являются ускоренное окисление гумуса и вынос растворенных соединений. Правда, окисление гумуса может компенсироваться его восстановлением и даже дополнительным накоплением при внесении в почву достаточных количеств удобрений. Однако происходит это пока в явно недостаточных масштабах.

Прежде чем рассматривать проявление природно-антропогенных процессов на пахотных землях в различных географических условиях, необходимо привести некоторые общие данные о них.

Эрозия почв. Как уже указывалось, поверхностная эрозия почв подразделяется большинством исследователей на плоскостную и линейную. Плоскостной смыв в сочетании с мелкоструйчатым наносит в настоящее время наибольший ущерб полям, так как в результате него уменьшается мощность плодородного верхнего горизонта почв, а они сами становятся слабо-, средне- или сильносмытыми. При этом в обратной зависимости от степени смытости находится противоэрозионная устойчивость почвенного покрова. Сильно смытые почвы — самые уязвимые. Противоэрозионная устойчивость почвы зависит и от механического состава, содержания гумуса, соотношения главных катионов в обменном комплексе. Почвы легкого механического состава обладают высокой водопроницаемостью, зато тяжелые по составу почвы более устойчивы к размыву.

Согласно М. Н. Заславскому [11], по снижению противоэрозионной устойчивости почвы располагаются следующим образом: подзолы → дерново-подзолистые → серые лесные → черноземы → каштановые → сероземы. Этот же автор подразделяет

эрозию почв по интенсивности на слабую (менее 5 т/га), среднюю (5—10 т/га), сильную (10—20 т/га), очень сильную (20—50 т/га) и катастрофическую (более 50 т/га).

Н. И. Маккавеевым описаны основные особенности плоскостной эрозии. Он указывает, что эрозия, осуществляемая дождевыми водами, стимулируется ударами капель, которые возбуждают в потоке волновую толчею, взвешивающую твердые частицы. С увеличением глубины потока влияние ударов капель быстро ослабевает. В результате плоскостной эрозии поток как бы лопатой снимает слой земли с верхней половины склона и перемещает его в нижнюю. Гидравлический режим потока на протяжении склона меняется от суперламинарного до вполне развитого турбулентного.

Наблюдения, проведенные В. П. Лидовым над процессами смыва и размыва дерново-подзолистых почв в Смоленской области, показали, что при расходе струи стока на пашне не более 2—3 л/с возникают временные линейные формы размыва (бороздки), которые уничтожаются последующей обработкой полей сельскохозяйственными орудиями. Там, где расходы струек склонового стока достигают 5—6 л/с и более, образуются постоянные формы размыва на пашнях — потяжины и ложбины. Эти линейные формы не расчлениют почвенный покров до материнского субстрата и по ним также свободно проходят сельскохозяйственные орудия. Все эти формы размыва В. П. Лидов относит к начальным формам линейной эрозии.

Потоки с расходами свыше 10—15 л/с формируют водоросины и овраги, расчлениют пашню, делают ее контуры в плане разорванными. Для всех форм рельефа, от мелких борозд до оврагов, характерно то, что они связаны с временным склоновым стоком талых или дождевых вод, а при искусственном обводнении территорий и со стоком, возникающим за счет иного водного питания.

Концентрация обломочного материала в воде при струйчатом смыве зависит от скорости течения. В условиях зяблевой вспашки на среднесуглинистых дерново-подзолистых почвах концентрация твердой взвеси обычно менее 10 г/л. При скоростях стока 0,4—0,5 м/с этот показатель увеличивается до 10—20 г/л. При скоростях свыше 0,6 м/с концентрация взвеси превышает 20 г/л и может достигать при определенных условиях 200—300 г/л.

Измерение смыва почвы с полей производится различными методами, наряду с которыми используются и расчеты. Вопросам расчета потерь почвы с неорошаемых полей при эрозии посвящено большое количество литературы. Г. И. Швец [44] обобщил данные 16 авторов, предложивших формулы для определения поверхностного смыва почвы. Наибольшим диапазоном практического применения, как он указывает, обладает универ-

сальное уравнение потери почвы У. Уишмейера и Д. Смита, которое имеет следующий вид:

$$E = RKLSCP,$$

где E — среднегодовые потери почвы; R — показатель эрозионной способности осадков; K — показатель противозрозионной устойчивости почвы; L — показатель длины склона; S — показатель крутизны склона; C — показатель севооборота; P — показатель почвозащитных мероприятий.

Все показатели, подставляемые в формулу, кроме показателя эрозионной способности осадков, получены на опытных полях США, находящихся в различных агроклиматических и почвенных условиях и характеризующихся неодинаковой практикой земледелия. Между цифрами потерь почвы, которые были определены расчетом по формуле Уишмейера—Смита и опытным путем, установлена хорошая сходимость.

Расчленение территорий оврагами не обязательно связано с их земледельческим использованием. Однако последнее в наибольшей степени «ответственно» за развитие овражной эрозии. Протяженность оврагов на единицу площади в настоящее время рассматривается в качестве одного из критериев интенсивности эрозионных процессов на полях.

В то же время следует отметить, что антропогенное оврагообразование, как правило, бывает интенсивнее природно-антропогенного.

Показательные закономерности роста оврагов установлены Л. Г. Рожковым на примере Молдавии. Интенсивность роста оврагов здесь зависит от ряда природных и хозяйственных факторов, основными из которых являются особенности таяния снега и ливневой характер осадков, литология пород и состав культур, выращиваемых на водосборной площади, особенности рельефа, размер водосбора и др. Прирост оврагов в длину происходит почти в равной степени как от стока талых вод, так и от ливней. Рост оврагов в песчаных породах осуществляется в 2—3 раза быстрее, чем в тяжелых суглинках. Овраги в лёссах по скорости роста занимают промежуточное положение. Между водосборной площадью оврага и скоростью его роста наблюдается прямая зависимость. Поэтому скорость роста донных оврагов в 2—3 раза выше, чем склоновых. Среди формул, предложенных для прогноза роста оврагов, одной из наиболее универсальных можно считать уравнение Томсона [49]. Оно имеет следующий вид:

$$R = 0,15A^{0,49}S^{0,14}P^{0,74}E^{1,00},$$

где R — среднегодовой прирост вершины оврага, в футах; A — водосборная площадь, в акрах; S — приблизительный уклон тальвега, в %; P — годовая сумма осадков (в дюймах), выпадающих в форме дождей с интенсивностью 0,5 дюйма в 24 ч

и более; E — содержание в размываемых породах глинистых частиц, в %.

Продолжающийся рост оврагов на возделываемых землях и других территориях представляет серьезную угрозу земельному фонду большинства стран. Для СССР Е. А. Мироновой составлена карта овражности, опубликованная в журнале «Геоморфология» (№ 3, 1971 г.) и перепечатанная в монографии Ф. В. Котлова [18]. Карта показывает высокую заовраженность юга и средней части Русской равнины (0,22—0,33 км/км²), причем наиболее сильно расчлененные оврагами территории соответствуют местам наибольшей распаханности, что однозначно указывает на природно-антропогенный генезис этих эрозионных форм.

Ускоренная аккумуляция наносов в долинах. Этот природно-антропогенный процесс связан в первую очередь с высокой распаханностью водосборов, их значительной эродированностью и часто наличием брошенных, не пригодных для земледелия участков бедленда. Ускоренная флювиальная аккумуляция, по сути дела, представляет собой обусловленную антропогенным фактором агградацию речных долин, происходящую сейчас в самых различных районах суши. Аккумуляция наносов происходит в условиях паводков, которые нередко представляют собой настоящее стихийное бедствие. Особенно опасны крупнейшие реки, которые в нижнем течении пересекают низменную равнину и находятся в обвалованном и в поднятом над нею русле. Таковы, например, реки Хуанхэ и Инд. Первая за последние 7000 лет 1600 раз прорывала укрепленные и превращенные в дамбы прирусловые валы и заливала значительные площади Северо-Китайской равнины; 7 раз река перемещала русло в другое место. Амплитуда его миграции в целом близка к 900 км. Во время наводнения 1887 г. была затоплена территория в 78 тыс. км². Многие селения были похоронены под трехметровым (!) слоем ила. Погибло около 2 млн. человек и еще около 7 млн. пострадало.

Темпы аккумуляции аллювия на поймах крупнейших рек очень значительны. Например, в пределах северного отрезка долины р. Миссисипи скорость седиментации определена в 0,9—6,5 см/год. По другим данным во время двухмесячного наводнения (с апреля по июнь) в 1973 г. в штате Луизиана р. Миссисипи отложила слой осадков мощностью порядка 1 см на пойме и до 53 см на прирусловых валах. Пойменный осадок был представлен на 97% илистыми и глинистыми частицами, тогда как в накоплениях прирусловых валов содержалось до 68% песчаной фракции. Темпы агградации мелких долин могут быть такими же, но чаще они несколько ниже и колеблются от 0,2 до 3 мм/год.

Дефляция почв. Ускоренное эоловое разрушение стоит на втором месте по масштабам последствий после эрозии. Осо-

бенно интенсивно ускоренная дефляция проявляется на неполивных землях, находящихся в засушливых районах. При неправильной культивации она наносит большой ущерб и орошаемым полям, а также угодьям, созданным на осушенных землях. Природно-антропогенная дефляция проявляется также на землях иного хозяйственного использования. Однако лучше всего ее механизм и эффект воздействия изучены на земледельческих площадях.

Как указывает К. С. Кальянов, дефляция, возникающая в результате взаимодействия ветра с подстилающей поверхностью, проявляется в форме насыщенного почвенными частицами потока воздуха, в котором идет их непрерывное выпадение на эту поверхность и подъем с нее. Дефляция почв возникает при определенных условиях, главными из которых в земледельческих районах является наличие сильных ветров и сухой оголенной почвы. Небольшое выдувание почвы, приводящее к ежегодной потере ее слоя в 0,2 мм или менее, по мнению М. Е. Бельгибаева, является допустимым и не представляет собой угрозу ее истощения, поскольку примерно на такую же величину происходит увеличение мощности почвы за счет природных процессов.

Согласно М. Е. Бельгибаеву, ветроустойчивость почв зависит в первую очередь от их гранулометрического состава. Приближенный коэффициент их ветроустойчивости определяется по соотношению массы почвенных агрегатов диаметром 1 мм и более к массе остальных частичек диаметром менее 1 мм. Слабоподатливые к дефляции почвы характеризуются коэффициентом ветроустойчивости >1 , среднеподатливые $1-0,5$ и сильноподатливые $<0,5$.

Развеваемость почв определяется двумя показателями: характером поверхности нанорельефа на пашне и степенью опесчаненности верхнего слоя почвы (табл. 9).

По степени дефлированности почвы удобно разделять на 4 группы (табл. 10).

Погребенность почв золовым материалом может быть: 1) незначительная — мощность навейного слоя до 10 см; 2) мелкая — до 20 см; 3) средняя — до 20—30 см; 4) глубокая — до 30—50 см и очень глубокая — более 50 см.

Согласно М. И. Долгилевич и др., критическая скорость ветра, при которой начинается дефляция, несколько различается для разных почв: для черноземов обыкновенных развитого механического состава она варьирует от 5,5 до 8,6 м/с; черноземов выщелоченных — от 5,9 до 6,5; черноземов южных — от 5,9 до 8,9; темно-каштановых и каштановых почв — от 6,1 до 7,8 и для солонца столбчатого составляет 12 м/с. Потери почвы вследствие ускоренного выдувания могут быть определены по формуле, заимствованной из «Руководства по сельскому хозяй-

Классификация развеваемости почв и ее диагностические показатели
на примере Северного Казахстана
(по М. Е. Бельгибаеву)

Степень развеваемости	Характер поверхности почвы	Обесчаненность верхнего слоя 0—5 см (потери физической глины), %
Слабая	Нанорельеф пашни сохранился (гребни и бороздки после прохода сеялки разрушены частично)	5
Средняя	Нанорельеф более сглажен, имеются ветровая рябь и косы навевания в зоне аккумуляции, ветровой элювий — в зоне выдувания	5—10
Сильная	Нанорельеф сглажен полностью, наличие ветровой ряби, кос навевания, овальных бугорков, плоских дюн и низких барханов в зоне аккумуляции, выдувы и ветровой элювий — в зоне дефляции	10

Таблица 10

Классификация фактической дефлированности почв
и ее диагностические показатели
(по М. Е. Бельгибаеву)

Степень дефлированности	Разрушенность гумусового горизонта	Потеря гумуса в горизонтах А+В, %	Обесчаненность пахотного слоя, %
Слабая	До 1/4 гор. А	10	5
Средняя	От 1/4 до 1/2 гор. А	10—25	5—10
Сильная	От 1/2 до полного выдувания гор. А	25—60	10—20
Очень сильная	Разрушением охвачен гор. В и нижележащие слои	60	20

ству» (№ 346), выпущенному Министерством сельского хозяйства США в 1968 г. Формула имеет следующий вид:

$$E = f(I', K', C', L', V),$$

где E — среднегодовые потери почвы; I' — показатель податливости почвы к дефляции, зависящей от ее механического состава и в первую очередь от процентного содержания частиц размером более 0,84 мм; K' — коэффициент шероховатости, определяющийся высотой и шириной борозд на поле; C' — показатель климата, устанавливаемый по данным о скорости ветра и влажности почвы; L' — показатель длины поля в направлении господствующих ветров; V — показатель количества, характера и расположения растительного покрова.

Приведенная зависимость построена на учете климатических условий, свойств почв, степени их защищенности растительностью, а также почвозащитной обработкой. Кроме того, учитывается протяженность действия ветрового потока.

В зонах степей и лесостепей, а также пустынь и полупустынь ускоренная дефляция часто приобретает характер пыльных бурь. Д. В. Наливкин [25] приводит образное описание пыльной бури, принадлежащее К. Кейсу. «Пыльная, или песчаная, буря в действительности такой же транспортирующий агент, как любая река. По сравнению с большой рекой — это гигант среди потоков, несущих осадочный материал. Его ширина 300—500 км по сравнению с 2—3 км ширины крупнейших рек. Он несет со скоростью 60 км в час вместо 5—10 км. Он переносит в сотни тысяч раз больше обломочного материала, громадная часть которого выносится из засушливых областей в полупустынные и влажные области. . .

В пыльной буре на дне, на высоте нескольких десятков сантиметров, движутся щебень и грубый песок. Тонкий песок летит на высоте человеческого роста. Выше идет темное, плотное облако пыли, поднимающееся вверх на 1,5 км и более. Когда на пыльную бурю смотришь с вершины горного пика сверху вниз, она кажется мощным, резко ограниченным потоком, быстро стремящимся вниз, вдаль. Насыщенный пылью воздушный поток несется вниз как громадный водяной поток» [25].

Пыльные бури делятся на вихревые и потоковые. Вихревые бури — это в большинстве случаев сложные образования, перемежающиеся на громадной площади. В их формировании возможно участие не только вихревых, но и потоковых движений воздуха. Потоковые бури значительно меньше по масштабам и не так сложны по динамике, как вихревые [25].

На земной поверхности вихревые потоки воздуха оставляют крупные овалы сильного выдувания почвы, разбросанные среди площадей менее интенсивной дефляции.

Ю. Войтанович, составивший мелкомасштабную карту распространения пыльных бурь на земном шаре, указывает, что намечаются три зоны их действия (рис. 4). Во-первых, это зона тропических пустынь, где имеют место желто-красные бури с интервалом вертикального проявления 5—6 км и горизонтального — 3—6 тыс. км. Для этих бурь характерен перенос пыли на большие расстояния в Атлантический и Тихий океаны. Во-вторых, это зона степей и лесостепей, где действуют черные бури. Они часты в Северной Америке и Евразии и относительно редко возникают в Южной Америке. В этих зонах дефляция является природно-антропогенной и только в третьей зоне — арктических и субарктических областей — в основном природной.

Развитие ускоренной дефляции происходит импульсами, которые совпадают с климатически обусловленными фазами уве-

личения сухости и ветровой активности на материках. Такие вспышки в некоторых районах оказываются особенно чувствительными, когда под влиянием социально-экономических причин подвергались экстенсивному земледельческому использованию дефляционно-опасные территории.

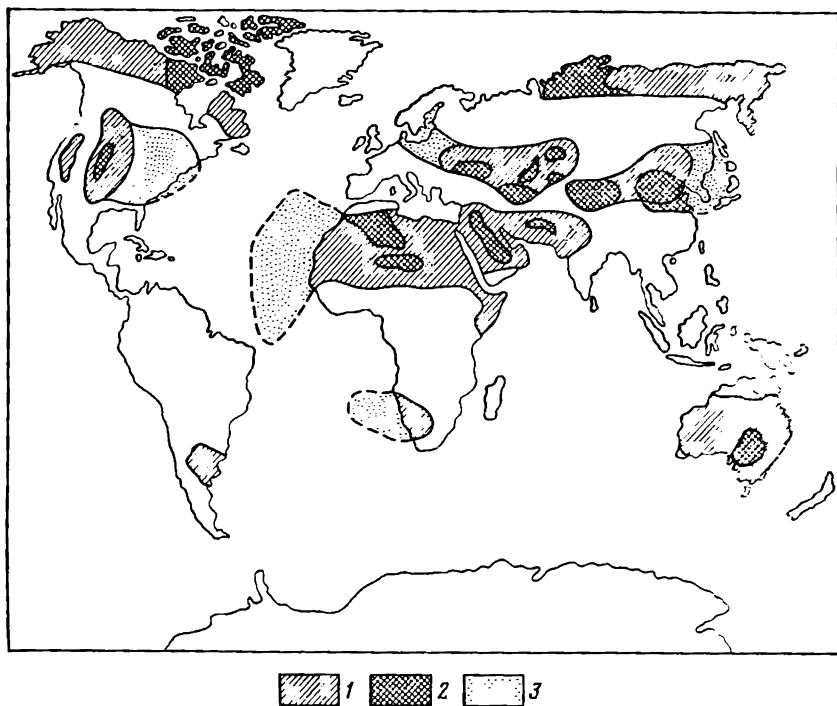


Рис. 4. Карта распространения пыльных бурь на земном шаре (по Ю. Войтановичу, 1976 г.):

1 — области проявления пыльных бурь; 2 — области наиболее частого проявления пыльных бурь; 3 — области навевания и аккумуляции аллохтонной эоловой пыли

В настоящее время ученые СССР, США и ряда других стран заняты прогнозированием развития природно-антропогенных процессов на дефляционно-опасных землях. Так, М. Боуден проанализировал данные о циклических изменениях земного климата в течение последних 700 лет и заключил, что Великим равнинам США в ближайшие 50 лет не грозят ухудшение увлажненности, опустынивание и связанная с этим интенсификация аридных процессов. Однако он не учитывал возможности планетарного антропогенного изменения климата. В отечественной литературе также имеются аналогичные разработки (К. С. Кальянов).

Окисление почвенного гумуса — серьезный негативный природно-антропогенный процесс. Он имеет большую

интенсивность всюду, где естественные почвы богаты органическим веществом, но теряют его при распашке в результате прямого окисления в экстремальных для них субэральных условиях. Кроме того, убыль гумуса связана с азотным истощением почв в условиях интенсивного выноса биогенных элементов с урожаем и отсутствием компенсации такого нарушения биологического круговорота удобрениями.

Согласно Б. П. Ахтырцеву, потери гумуса в основных почвенных зонах при отсутствии удобрений составляют 6,4 ц/га × год. Т. И. Евдокимова и соавторы указывают, что при распашке целины потеря гумуса за счет окисления сначала идет быстрыми темпами, но затем замедляется. Однако в целом потери гумуса за 100 лет достигают 30 %, что для черноземов выражается цифрой порядка 170 т/га.

В тропиках применение подсечного земледелия ведет к повышению температуры почв вследствие резкого увеличения их освещенности. При этом падает активность микроорганизмов, замедляются разложение органических остатков и синтез гумусовых веществ. О том, в каких масштабах снижается количество органического вещества в почве в условиях подсечного земледелия, можно судить по данным табл. 11.

Таблица 11

**Содержание органического вещества и азота
при различной глубине почв [21]**

Почва	Органическое вещество, %			Азот, %		
	0—15 см	15—30 см	30—60 см	0—15 см	15—30 см	30—60 см
Первичного леса	2,19	0,97	0,79	0,09	0,06	0,05
Выжженного леса	0,93	0,93	0,77	0,05	0,04	0,03
Срубленного леса	1,64	0,97	0,52	0,08	0,05	0,03

Сведения из табл. 11 показывают, что в современных условиях неорошаемое, а зачастую и поливное земледелие чаще всего приводит к быстрому уменьшению запасов органического вещества почвы. Существенную роль в этом играют безвозвратные потери гумуса вследствие его окисления при распашке и избыточного расходования при извлечении растениями питательных веществ из почвы.

*Специфика природно-антропогенных процессов
на осушенных землях*

В нашей стране за годы Советской власти осушено более 15 млн. га болот и заболоченных земель, в том числе закрытым дренажом, как наиболее прогрессивным способом осушения,— 7,4 млн. га. Осушенные земли играют важную роль в получе-

нии сельскохозяйственной продукции. Однако их использование в этом направлении должно осуществляться в каких-то определенных допустимых масштабах, поскольку болота выполняют важные природоохранные функции и, кроме того, их перевод в сферу земледельческого использования сам по себе сопровождается рядом негативных последствий. К числу наиболее общих из них относятся:

1. Оседание поверхности. По наблюдениям на Корзинском опытно-мелиоративном стационаре в Карелии установлено, что осадка торфа на осушенном болоте осуществляется со скоростью 0,7—1,0 см/год. Приводящий эти данные И. М. Нестеренко указывает, что при осадке увеличивается плотность торфа с 0,08—0,10 до 0,18—0,20 г/см³ за счет преобразования его верхнего слоя, сдирания очеса, запахивания его и удаления воды. При достижении плотности в 0,22—0,24 г/см³ состояние торфяной массы относительно стабилизируется. Гораздо быстрее происходит осадка поверхности Тарманского торфяного болота в Тюменской области. За 4 года осушения она понизилась, согласно данным И. М. Романовой, на 38 см.

Длительные наблюдения за осадкой огромного осушенного массива, сложенного органомными накоплениями, ведутся во Флориде в районе г. Эверглейдс. Площадь массива около 0,8 млн. га. За 55 лет от трехметрового плодородного поверхностного слоя здесь осталось немногим более 1 м. Если не будут приняты радикальные почвозащитные меры, то к 2000 г. 88 % мощности органомного слоя в районе г. Эверглейдс окажется утраченной [46].

2. Разложение органического вещества. В первые годы осушения разложение торфа, по данным для Корзинского стационара в Карелии, составляло 2,5 т/га в год. В. Ф. Русецкий вел наблюдения в течение 6 лет за изменениями, происходившими с дерново-перегнойно-глеевой почвой, которая занимает одно из понижений на первой террасе р. Припять в ее верхнем течении. Понижение было осушено сетью открытых каналов. Под влиянием первичной вспашки изменился профиль содержания органического вещества в пахотном горизонте. При этом как при севообороте, так и при монокультуре трав под влиянием осушения и в процессе сельскохозяйственного использования запасы органического вещества в пахотном горизонте уменьшились на 150—160 т/га, средняя скорость его потери составляла 25—26 т/га в год. В целом интенсивность минерализации органического вещества почвы постепенно снижалась. В верхнем полуметровом слое почвы за шесть лет использования снизились запасы азота с 29—30 до 24—25 т/га. В. Ф. Русецкий указывает, что запахивание дернины при первичной вспашке на глубину 35—40 см в виде прослойки способствует лучшему сохранению органического вещества и плодородия почвы, рациональному использованию азота почвы растениями.

3. Дефляция является широко развитым процессом на осушенных торфяниках и особенно значительна там, где они имеют небольшую мощность и заняты пропашными культурами. П. А. Ковриго выделяет четыре разновидности осуществляющейся в таких условиях ускоренной дефляции: а) пыльные бури, вызываемые скоростями ветра свыше 10 м/с, захватывающие значительные пространства и переносящие массу почвы до 10 т с 1 га на далекие расстояния. Размеры переносимых почвенных частиц достигают нескольких сантиметров; б) дефляция, обусловленная скоростями ветра 4—10 м/с (дефляция адвекции). Она проявляется на небольших участках на переосушенной поверхности почвы. Размеры захватываемых ветром почвенных комочков не превышают 5 мм; в) дефляция конвекции, возникающая в ясную погоду при скорости ветра менее 4 м/с над переосушенной и перегретой поверхностью торфяной почвы в виде пыльных вихрей. Вихрями захватываются частички почвы менее 2 мм. Торфяная почва обладает низким альбедо (9—10 %) и способна перегреваться до 60 °С и более; г) дефляция в ходе обработки почвы сельскохозяйственными машинами, возникающая в сухую погоду на участках с низкой влажностью почвы.

Помимо прямых негативных последствий, осушение переувлажненных почв и болот с целью их сельскохозяйственного использования вызывает существенные изменения в составе растительного покрова, гидрографии и режиме стока рек прилегающих территорий. А. Г. Медведев и С. М. Зайко указывают на возможность быстрого исчезновения мелиорированных маломощных торфяных почв, сработка которых в Белоруссии происходит со скоростью 1—3 см/год, и усиление дефляции на старопахотных почвах. Кроме того, в процессе мелиорирования земель здесь происходит усыхание рек и озер, гибель садов и еловых лесов. Более маловодными делаются реки, питаемые осушаемыми болотами. В то же время вынос растворимых соединений ими увеличивается в 1,5—2 раза.

Проявление природно-антропогенных процессов в различных географических условиях

Данные о специфике природно-антропогенных процессов на пахотных землях в различных географических условиях неравноценны. Если для развитых стран, в особенности таких, как СССР, США и Австралия, по этому вопросу имеется обширная литература, то этого нельзя сказать о развивающихся странах. Нижеприводимые сведения отражают эту неравномерность в наличии информации.

Бореальный пояс. *Области криолитозоны.* Особенности проявления ускоренной денудации на пашне в условиях разви-

тия многолетнемерзлых пород рассмотрены А. Д. Орловым и Г. М. Поповым на примере Якутии. Все земледельческие районы расположены здесь в зоне мощных многолетнемерзлых пород с температурой до -6°C и широкого развития мощных подземных льдов. Мощность деятельного слоя здесь достигает 2—3 м.

Почвы Якутии исключительно ранимы. Им свойственна очень небольшая мощность генетических горизонтов с содержанием гумуса более 1%. Так, у мерзлотных таежных палевох осолоделых почв, являющихся доминирующим зональным типом, мощность генетических горизонтов с содержанием гумуса более 1% в основном не превышает 15—25 см. В горизонтах, вовлекаемых в пахотный слой, содержится более 70% валового запаса гумуса и подвижных форм питательных элементов. Наличие в пахотном слое обменного натрия, вовлекаемого в него вместе с иллювиальным горизонтом, обуславливает его запыляемость, слабую водопрочность и повышенную плотность при высыхании. Почвы становятся бесструктурными и распыленными от резких колебаний температуры.

Из-за того, что почвы Якутии имеют низкую температуру, первые порции талых вод, попадающие в них, создают водонепроницаемый экран. Поэтому даже при небольших уклонах сток талых вод производит большую эрозионную работу. Но особенно сильно она проявляется на распаханых склонах, с которых за весну иногда теряется до 200—300 м³ почвы с 1 га. Летние дожди тоже могут смывать значительное количество почвы. Известен случай, когда один летний ливень (за 2 ч. 45 мин. выпало 47 мм осадков) снес с парующегося участка площадью 5 га 220 м³ мелкоземы.

Наличие сложного неровного мерзлотного микрорельефа вносит особую специфику в характер эродированного почвенного покрова. Так, на площадях с полигонально-грядовым бугристо-западинным рельефом распашка приводит к смыву и сплыву плодородного пахотного слоя с вершин бугров в западины. В то же время цепочки западин служат хорошей основой для развития промоин и оврагов.

Предрасположенность возделываемых почв Якутии к эрозии создается также и тем, что успешное выращивание сельскохозяйственных культур требует их размещения на хорошо теплообеспеченных поверхностях рельефа, к которым в первую очередь относятся склоны южной и юго-западной экспозиции. Весьма уязвимы к ускоренной денудации и уголья, занимающие днища долин.

Относительно высокая интенсивность эрозии земельных угодий Якутии связана и с тем, что из 135—155 дней, на протяжении которых почва находится в талом состоянии, густое покрытие пашни растительным покровом составляет всего 45—60 дней. Кроме того, как указывают А. Д. Орлов и Г. М. Попов,

около 30 % площади пашни Якутской АССР ежегодно находится под парами.

Лоскутное расположение пашни среди тайги обуславливает во многих случаях наличие транзитного весеннего стока через нее с таящих водоразделов. В это время пашня уже находится в переувлажненном состоянии, так как снег на ней протаивает на 3—6 дней раньше, чем под лесом.

Кроме эрозии, пахотные угодья Якутии подвергаются дефляции. Особенно сильно она проявляется весной и больше всего на днищах крупных долин. Из-за мелкоконтурности, разбросанности пахотных угодий и слабой распаханности территории пыльные бури не возникают.

В настоящее время в Якутии применяется целый комплекс мер, снижающих интенсивность ускоренной денудации на пахотных землях.

Бореальный пояс. Области вне криолитозоны. О развитии ускоренной денудации на пахотных угодьях в таких областях можно составить представление по данным для территории Нечерноземной зоны РСФСР. Исследования В. Родионова, Г. Несмеянова и В. Орловой позволили установить ряд особенностей ускоренной эрозии почв в этом регионе. Пестрота литологических условий в областях развития отложений валдайского и московского оледенений, резкие смены типов рельефа обуславливают значительную пестроту в распространении эрозионных явлений. На больших площадях плоских моренных и зандровых равнин эрозия практически отсутствует. Однако на расчлененных возвышенностях пашня оказывается сильно эродированной на площади 30—50 % и более.

Основным видом эрозии почв в Нечерноземной зоне является их разрушение стоком талых вод при снеготаянии. В виде снега на полях ежегодно в холодный период накапливается 120 мм осадков и более. Весенний сток составляет около 70 % годового. Из-за одновременности снеготаяния сток на различных участках склонов проходит по уже оттаявшей переувлажненной почве, вызывая ее смыв. При этом на полях остаются промоины, а вынесенный с полей обломочный материал откладывается на склонах и частично попадает в гидрографическую сеть. И. В. Старостина подсчитала, что в бассейне р. Оки около 60 % объема продуктов смыва почв откладывается в нижних частях склонов, 20 % — в логах и балках, 10 % — в руслах и на поймах малых рек и лишь 10 % формирует твердый сток средних и крупных рек.

Исследование динамики эрозии почв в условиях Нечерноземья выполнено В. П. Лидовым. По наблюдениям в Смоленской области им установлено, что струйчатый сток на почве, лишенной снежного покрова, не превышает 20 % от общих запасов воды в снежном покрове. Основная часть талых снежных вод стекает под снежным покровом. Величина струйчатого стока,

производящего размыв почвы, связана главным образом с одновременностью схода снега в разных частях склонов. На склонах южной экспозиции быстрее всего выступают из-под снега крутые участки. Они и эродируются в наибольшей степени, что связано также с прогреваемостью почвы на них и быстрым переходом ее в талое состояние. О масштабах выноса обломочного материала с таких склонов во время весеннего снеготаяния дают представление данные, полученные на репрезентативном участке (табл. 12).

Таблица 12

Объем выноса твердого материала на склоне южной экспозиции за весну 1965 г. с пашни в Смоленской области (по В. П. Лидову)

Отрезок склона	Крутизна отрезка склона, градус	Количество бороздок размыва на 80 м поперек склона	Объем выноса, м ³ /га	Удаленный слой почвы за весну, мм
Средняя часть склона	9	72	20,4	2,0
	8	59	15,9	1,5
Нижняя часть склона	6	39	5,6	0,5
	5	27	9,7	1,0

Данные табл. 12 показывают, что на крутых участках склонов южной экспозиции смыв почвы идет со скоростью 1,5—2 мм/год. Развитые в Смоленской области дерново-подзолистые почвы при таких темпах эрозии только в результате весеннего смыва лишаются гумусового горизонта примерно через 150 лет, если скорость его восстановления при этом будет составлять 0,5 мм/год.

Гораздо слабее смыв почвы происходит весной на склонах северной экспозиции, достигая максимума всего 3 м³/га.

Интенсивность снеготаяния и его результаты во многом зависят от условий, в которых находится тот или иной участок пашни. Оставление стерни задерживало снеготаяние на 2—3 дня по сравнению с пашней. В лесополосах и кустарниках такая задержка составляла 6—7 дней. Очень сильный смыв производят талые воды из снежных сугробов лесонасаждений, когда они поступают на нижерасположенную пашню, которая к тому времени полностью лишена снежного покрова и находится в талом и переувлажненном состоянии.

Эрозия почв приводит к уменьшению запасов гумуса и биогенных элементов в них. По данным В. П. Лидова, в несмытых дерново-подзолистых почвах Смоленской области содержание гумуса в верхнем пахотном горизонте близко к 78 т/га, для среднесмытых почв этот показатель составляет примерно

42 т/га, а для сильносмытых — 35 т/га. Существенно снижены также и запасы азота в эродированных почвах.

Суббореальный пояс. В этом поясе специфика природно-антропогенных процессов на пашне сильно варьирует в зависимости от изменения гидротермических условий. В гумидных областях господствует ускоренная эрозия, в областях с засушливым климатом она дополняется процессами, связанными с деятельностью ветра. В пустынях возделываемые угодья являются орошаемыми, происходящие на них изменения относятся к антропогенным процессам-следствиям, рассмотренным выше.

Гумидные области. Показательные данные о проявлении ускоренной эрозии почв и связанных с нею аккумулятивных процессов в гумидных областях суббореального пояса имеются по одному из участков предгорий Аппалачских гор — северу Пидмонта (США).

Пидмонт, получающий ежегодно от 1000 до 2000 мм осадков, представляет собой восточное предгорье Аппалачского хребта. Его ширина от 50 до 200 км. Слабо холмистый платообразный рельеф выработан в кристаллических сланцах и гранито-гнейсах и имеет высоты от 200—400 м у подножия гор до 40—80 м у сочленения с прибрежной равниной.

Дж. Коста детально изучил в пределах Северного Пидмонта участок Вестерн Ран неподалеку от Балтимора в штате Мэриленд (рис. 5). Мелкая речная сеть участка относится к нижней части бассейна р. Потомак. Площадь участка 155 км². Более 80 % площади занимают фермерские поля, леса и пастбища. Долинная сеть достаточно разработанная и с относительно некрутым падением (20—40 м/км). Преобладающими почвами являются бурые лесные оподзоленные, сформировавшиеся под пологом дубово-буковых и сосново-дубовых лесов.

Интенсивная эрозия почв началась в XVIII в. и продолжалась до начала 40-х годов XX в. Фермеры стремились прежде всего заработать на продаже табака в Европу. Для этого они применяли «американский вариант» подсеčno-огневого земледелия. Девственные леса вырубались и из древесины получали золу для удобрения. В течение двух лет со вновь образованных таким путем полей получали 3—4 урожая. После этого поля либо забрасывались и они постепенно зарастали вторичными лесами, либо использовались под зерновые, а для выращивания табачных культур обезлесивались новые земли. Такая система земледользования, как указывает Дж. Коста, сопровождалась сильной эрозией почв в пределах всего Пидмонта. Величина их смыва достигла здесь к началу 30-х годов XX в. от 7,6 до 30,5 см. В пределах участка Вестерн Ран она в среднем равнялась 15,2 см.

Исследование поверхностных отложений на этом участке показало, что хозяйственная деятельность человека привела к воз-

никновенно специфического природно-антропогенного парагенеза накоплений. В седловинах между вершинами и на склонах, в особенности в их основании, накопился делювий. В местах соединения мелких долин, дренируемых временными водотоками, поверх перигляциального солифлюкция аккумуляровались слоистые делювиально-пролювиальные образования, сложенные песками (от грубозернистых до мелкозернистых) и алевритами. В разрезе одного из слагаемых этими образованиями конуса

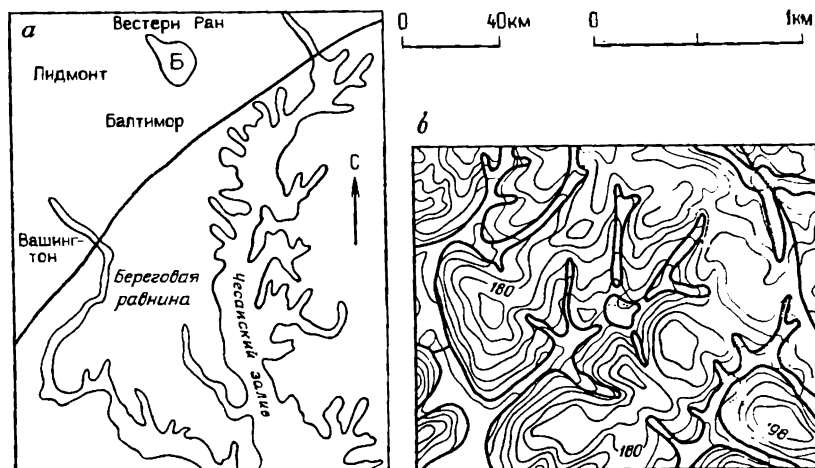


Рис. 5. Местоположение (а) и топография (б) участка Вестерн Раян (Б). На схеме местоположения жирная линия — раздел Пидмонта и Береговой равнины. На топографическом плане жирными линиями обведены днища долин с развитым на них природно-антропогенным аллювием; точками заштрихован природно-антропогенный пролювиально-делювиальный конус выноса (по Дж. Коста, 1975 г.)

выноса обнаружена древесина, датированная по радиоуглероду в 290 ± 100 лет.

Ускоренная аккумуляция на пойме сносившегося с полей материала привела к погребению почвы, венчавшей разрез пойменного аллювия. Поверх почвы накопились красновато-коричневые алевриты мощностью от 0,05 до 1,8 м. Такая окраска аллювия периода сельскохозяйственной эрозии почвы связана с преобладанием красноцветного сапролита под ее верхними горизонтами. В подошве красновато-коричневого пойменного алеврита найдены бревна со следами порубов, различный хозяйственный мусор, в том числе металлический скарб, бой от фарфоровой посуды и обломки створок моллюсков. Дроблеными створками фермеры удобряли почву, причем моллюски, раковины которых употреблялись для этой цели, происходили из Чесапикского залива.

В одном из разрезов красновато-коричневого алеврита на глубине 0,81 м найдены автомобильные лицензионные пластинки с датами 1920 и 1924 гг. Это свидетельствует о том, что средняя скорость накопления пойменного аллювия равнялась 1,63 см/год. Однако после 1943 г. в связи с введением в районе почвоохранной практики аккумуляция происходила замедленными темпами. В целом средняя мощность пойменного аллювия, накопленного за период ускоренной эрозии почв, оценена в 0,9 м.

Ускоренная аккумуляция аллювия имела ярко выраженный констративный характер, потому что вся долинная сеть Пидмонта за промежуток времени в 100—200 лет, а иногда и менее, оказалась подвешена в молодом природно-антропогенном аллювии мощностью в несколько метров. Скорость аккумуляции в наиболее быстро агградировавших руслах, по-видимому, была близка к 10 см в год.

Таким образом, хозяйственная деятельность человека, в основном экстенсивное использование земли под пахотные угодья, в корне изменила функционирование водосборных ПЭК в пределах Пидмонта. Это и запечатлелось в строении молодой природно-антропогенной формации поверхностных отложений, в состав которой вошли делювий, балочные заполнения, констративный аллювий и, местами, накопления водохранилищ.

По подсчетам Дж. Коста, в результате смыва с полей и в меньшей мере с других мест в пределах участка Вестерн Ран 52 % объема образовавшихся седиментов задержалось вблизи источников сноса и сформировало делювиальные покровы и конусы выноса, 14 % — верхний красновато-коричневый горизонт пойменного аллювия и 34 % было вынесено за пределы бассейна главным образом в форме взвешенных наносов, и осело в водохранилище Лоч Рэвин. Аккумуляция на его дне, по данным измерений за период с 1914 по 1942 г., происходила со скоростью 300 м³/км²·год, а с 1943 г. она снизилась вдвое.

Охрана сельскохозяйственных земель от эрозии, включавшая и частичное восстановление лесов, начатая в 30-х годах, в начале 40-х годов ощутимо сказалась на экзодинамических процессах. Смыв почвенного покрова существенно уменьшился, снизилась мутность водотоков, упала скорость аккумуляции пойменного аллювия и осадков в водохранилище Лоч Рэвин. Начался врез водотоков в ранее накопленные наносы.

Р. Мид и С. Тримбл приводят сведения об агградации и деградации русла р. Моулдин Милсайт, небольшого притока р. Олтомахо. Еще в 1865 г. этот приток, имеющий ширину 13—14 м и глубину до 4 м, врезался в скальные породы Пидмонта. К 1930 г. в его русле накопилась толща аллювия мощностью 5—6 м, который «выплеснулся» и на прилегающую пойму. Однако в 1969 г. примерно половина мощности пачки аллювия была уничтожена благодаря врезанию русла (рис. 6). Темпы

углубления дна долины р. Олтомахо примерно равны скорости предшествовавшей агградации.

Врез рек Пидмонта в наносы, отложенные в их руслах и на пойме в период неконтролируемой эрозии почв, фиксируется также на изменении пика мутности их вод. Если в указанный период он приходился на летнюю межень, что с очевидностью указывало на существенный привнос седиментов со склонов,

то в последующее время почвоохранных мероприятий максимум мутности стал приходиться на паводки, во время которых река с наибольшей силой эродировала дно и берега.

Показательно, что эрозия движется по руслам сверху вниз. Это установлено на основании анализа частоты паводков на реках Пидмонта в пределах штатов Мэриленд, Северная Каролина, Южная Каролина и Алабама. Оказалось, что на реках с водосборами менее 26 км² паводки проявляются раз в 4—5 лет, а на реках с большими водосборами — раз в 3 года. Это свидетельствует, по мнению Дж. Коста, о начавшемся углублении русел в верховьях

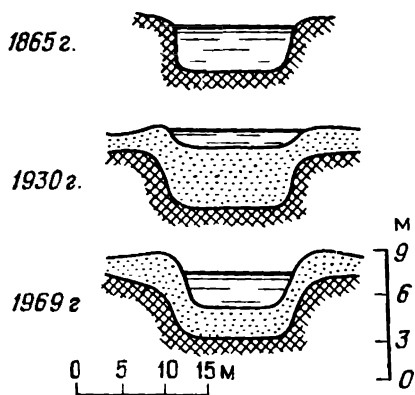


Рис. 6. Поперечные разрезы через русло р. Маулдан Милсайт, показывающие его агградацию и деградацию в период 1865—1969 гг. В 1865 г. русло было врезано в плотные породы, к 1930 г. заполнено аллювием, к 1969 г. часть аллювия была размыта (по Р. Мид и С. Тримбл, 1974 г.)

бассейнов рек, подвергшихся агградации в период неконтролируемой эрозии почв.

Пример изучения ускоренной эрозии и аккумуляции в пределах Пидмонта позволяет уловить определенные закономерности в развитии равнинного ПЭК врезания в условиях очень значительной антропогенной нагрузки и последующего некоторого ее снижения. Эти закономерности таковы.

1. Замена лесной растительности на больших площадях пахотными угодьями без проведения противозерозионных мероприятий приводит к трансформации ПЭК от типа врезания к типу планации.
2. При функционировании водосборного ПЭК по типу планации резко превалирует механический снос, ассоциирующийся с ускоренной аккумуляцией продуктов денудации вблизи источников сноса.
3. Перестройка чехла поверхностных отложений идет таким образом, что на большинстве плакорных поверхностей рельефа их мощность уменьшается, а в долинах и у других местных базисов денудации быстро увеличивается.
4. Ресурсы органического вещества биосферы, уменьшенные че-

ловеком в результате сведения леса и уничтожения подстилки, теряются также вследствие природно-антропогенной денудации почвы (смыв гумусового горизонта, окисление гумуса при распашке) и истощения почвы при выносе с урожаем и уплотнении ее машинами. 5. Введение почвоохранных мер вызывает обратную перестройку и частичное восстановление функций высокоорганизованного ПЭК взрезания.

Следовательно, экстенсивное сельскохозяйственное использование равнинных водосборных ПЭК взрезания неизбежно должно приводить к их частичному или полному превращению в антропогенный бедленд. А это означает, что ассимиляция солнечной энергии такими участками суши и использование ее при функционировании ПЭК резко понижается. Высокоорганизованный благодаря насыщению живым веществом ПЭК взрезания превращается в примитивный ПЭК планации. Препятствовать этому могут только действенные почвоохранные меры.

Семигумидные и семиаридные области. Здесь развиты наиболее продуктивные и поэтому наиболее ценные почвы — в первую очередь различные черноземные и каштановые. Важной особенностью названных областей является широкое распространение в них лёссовых пород.

Сильная эрозия на полях, приуроченных к лёссовым покровам, фиксируется во многих регионах мира. Например, в центральной части бассейна р. Хуанхэ в Китае ежегодный смыв с водосбора площадью 7 тыс. га составляет 181 т/га. Для земель различного использования установлены следующие модули смыва: пашня — 161, крутые склоны под выпасом — 195 и прочие земли (овраги, бедленд, дороги и крупные поселки) — 284 т/га·год.

Беспрецедентно высокая эродированность почв лёссового плато во многом обусловлена историческими причинами. Как указывает Д. Л. Арманд, истребив леса и будучи вынуждены кормить скот соломой, а отапливаться корнями злаков, китайские крестьяне вконец обеднили почву. В результате почва и лёсс смывались со скоростью до 3 мм/год.

В настоящее время распашка здесь ведется вдоль горизонталей, причем ею захватываются все склоны крутизной до 35°, а местами до 50°. Однако на крутых склонах поперечная пахота не дает достаточно эффективной защиты. При дожде возникает струйчатый смыв и склон испещряется сетью водороев, которые начинаются уже в нескольких метрах от водораздела. При пахоте они заравниваются, но дефицит почвы остается. Поскольку пахота ведется узкими лентами, расположенными поперек склона и разделенными лёссовыми валиками, то снесенная почва скапливается перед ними и ленты постепенно превращаются в террасы. Всюду, где террас нет или валики неисправны, снос почвы колеблется от 100 до 450 т/га. Поэтому земледелие

ведется по сути дела на голом грунте и поддерживается только ежегодным внесением компостов.

Лёссовое плато является местом сильнейшего оврагообразования. Средняя густота овражной сети в эрозионных районах равна 3—4, а местами до 8 км/км². Есть районы, где оврагами занято до 50 % всей площади. Средний регрессивный рост оврагов равен 3 мм/год. Однако бывают и случаи катастрофического их роста. В одном из них зарегистрирован прирост оврага на 1 км в течение года.

Показательные данные по эрозии почв в районах распространения лёссовых пород приводят Р. Пайст и С. Земники. Ими произведено сравнение ее развития в США, в штате Айова, и в Польше, на Люблинском плато.

Лёссы покрывают 51,1 млн. га в США и 1,4 млн. га в Польше. Происхождение лёссов в бассейне р. Миссури и в верхнем течении р. Миссисипи флювиальное, тогда как польские лёссы принято считать эоловыми. И те, и другие накапливались в ледниковые эпохи. Лёссы и почвы на них чрезвычайно податливы к размыву, что объясняется их специфическими свойствами (табл. 13).

Данные табл. 13 свидетельствуют о том, что почвы штата Айова обладают более тонким механическим составом, несколько богаче органическим веществом и беднее карбонатами, чем на Люблинском плато. Следовательно, они более устойчивы к размыву. Айовским лёссам, как указывают упомянутые авторы, свойственно повышенное содержание монтмориллонита по сравнению с люблинскими.

В США на лёссовых возвышенностях верховий р. Миссисипи потери почвы с поля, находящегося под паром, составили, по данным измерений на опытной станции, 211 т/га·год.

В Польше было проведено определение смытого слоя почвы на распахивавшихся склонах лёссовых возвышенностей в период с 1882 по 1925 г. Оказалось, что всего смыто 210 мм почвы.

Типичные характеристики почв: 1) района г. Трейнер (штат Айова, США)

Районы	Горизонты	Гранулометрический состав				Индекс пластичности
		песок > 50 мм	ил. 50—2 мм	глина 2 мм	средний размер, мм	
1	Пахотный	2—4	65—75	25—30	15—30	14—20
	Подпахотный	2—4	60—85	10—35	15—30	11—18
2	Пахотный	10—30	70—80	15—30	20—40	4
	Подпахотный	10—30	70—80	15—30	20—40	9—18

Таким образом, ежегодные потери составляли порядка 60 т/га. Примерно вдвое больше смытого материала (120 т/га) откладывалось в основании эродировавшихся склонов. Эти потери сравнимы с данными о смыве почвы в районе лёссовых холмов на западе штата Айова, которые эродируются со скоростью 45 т/га·год, что соответствует их снижению примерно на 0,3 м в 100 лет.

Овражная эрозия в Западной Айове началась с момента ее сельскохозяйственного освоения примерно в середине XIX в. Однако углубление и расширение овражной сети наиболее сильно произошло в последние годы. Например, руч. Вест-Таркино-Крик около границы Айовы со штатом Миссури углубился с 1920 г. на 6,7 м и значительно расширился. Такое понижение местного базиса эрозии вызвало активизацию роста промоин, выходящих в овраг с прилежащих полей. Вследствие неравномерности поверхностного стока наиболее интенсивно развитие оврагов и обрушение овражных стенок идет здесь в мае — июне, когда более 80 % материала, перемещаемого по днищам оврагов за год, выносится за их пределы.

В течение 12-летнего периода (1964—1975 гг.) велось измерение скоростей овражной эрозии и модулей твердого стока ручьев в штате Айова около Трейнора. Средний модуль твердого стока ручьев, дренирующих кукурузные поля, на которых осуществляется безотвальная вспашка, был 9 т/га·год. Эрозионный смыв в оврагах на водосборе с почвоохранными мероприятиями был всего 0,2 т/га·год.

В Польше 15 000 км оврагов, значительная часть которых находится на Люблинском плато, несущем лёссовый покров. Около 10 изученных активных оврагов заложены в XVIII—XIX вв. Установлено, что продольные профили этих оврагов принимают все более низкое положение и этот процесс идет со скоростью около 1 м в 10 лет. Оврагообразование здесь, по-видимому, не так интенсивно, как в районе Трейнора. В отличие

Таблица 13

и 2) Люблинского плато (Польша) (по Р. Пайсту и С. Земники)

Предел водонасыщения, %	Плотность	Органическое вещество, %	pH	CaCO ₃ , %	Na ⁺ , ммоль / 100 г породы
38—45	1,0—1,4	0—5	6,5	0	0—2
32—40	1,2—1,6	0—5	7,0—8,0	4—8	0—2
29—30	1,1—1,3	1—2	6,5	0—14	<1
24—38	1,4—1,6	0—4	6,5—8,0	0—17	<1

от Айовы на Люблинском плато большую роль в развитии оврагов играют талые воды.

Возделываемые земли семигумидных и семиаридных областей суббореального пояса в нашей стране — одни из наиболее сильно эродируемых среди равнинных земель. Н. И. Маккавеев указывает, что на Русской равнине максимум интенсивности эрозии приходится на лесостепную и северную части степной зон. Средние модули твердого стока для рек с площадями водосбора от 25 до 100 тыс. км² здесь составляет от 20 до 50 т/км², заметно возрастая с запада на восток. Густота овражной сети максимальная (0,22 км/км²). Оценить объем смыва почвы в средних цифрах, как пишет упомянутый автор, здесь невозможно, поскольку большая часть площади распахана и интенсивность смыва со склонов сильно колеблется во времени и пространстве в зависимости от агротехники, состава возделываемых культур, характера выполненных противоэрозионных мероприятий и т. п.

Доля обломочного материала, формирующего твердый сток средних и больших рек, в этих условиях близка к 10 % от его массы, сносимой с полей. Таким образом, модуль твердого стока в звене нерусловых потоков для лесостепной и севера степной зоны Русской равнины оценен Н. И. Маккавеевым примерно в 200 т/км²·год.

Одна часть продуктов смыва почв оседает у подножия склонов, в западинах и балках, а другая — на поймах и в руслах малых рек. Меженный поток этих рек все больше рассредоточивается в накапливающемся аллювии, становится подруловым, а речная долина превращается в балку. В результате этого имеет место сокращение протяженности системы постоянных водотоков, что подтверждается сравнением рисунков гидросети для одной и той же площади, в разной степени освоенной пахотными угодьями за счет сведения лесов (рис. 7).

Наиболее интенсивно ускоренная денудация проявляется на возвышенностях. Так, согласно Э. А. Часовниковой, для Ульяновского Поволжья смыв и размыв почвы на распаханных склонах определен в 20—200 т/га·год. Средняя густота оврагов на возвышенном правом берегу р. Волги равняется 0,9 км/км², а густота эрозионных туннелей — 10—15 м/км².

Значительное развитие эрозия почв имеет в Ворошиловградской области, где большая расчлененность рельефа (около 900 тыс. га пахотных земель находится на склонах круче 2°), выпадение осадков в виде ливней и ряд других факторов способствуют смыву верхнего наиболее плодородного слоя почвы. По данным В. И. Донюшкина и соавторов, по сравнению с несмытыми почвами слабосмытые содержат гумуса на 10—20 % меньше, среднесмытые — на 40—50 %, а сильносмытые — на 70—80 % и меньше. Если в несмытом обыкновенном черноземе в полуметровом слое валового азота содержится 14,2 т/га, то

в сильносмывом — 5,9 т/га. Сходным образом изменены и запасы фосфора и калия.

С увеличением смывости в черноземах уменьшается содержание глинистых частиц. А это вместе со снижением содержания гумуса приводит к падению емкости поглощения почвы.

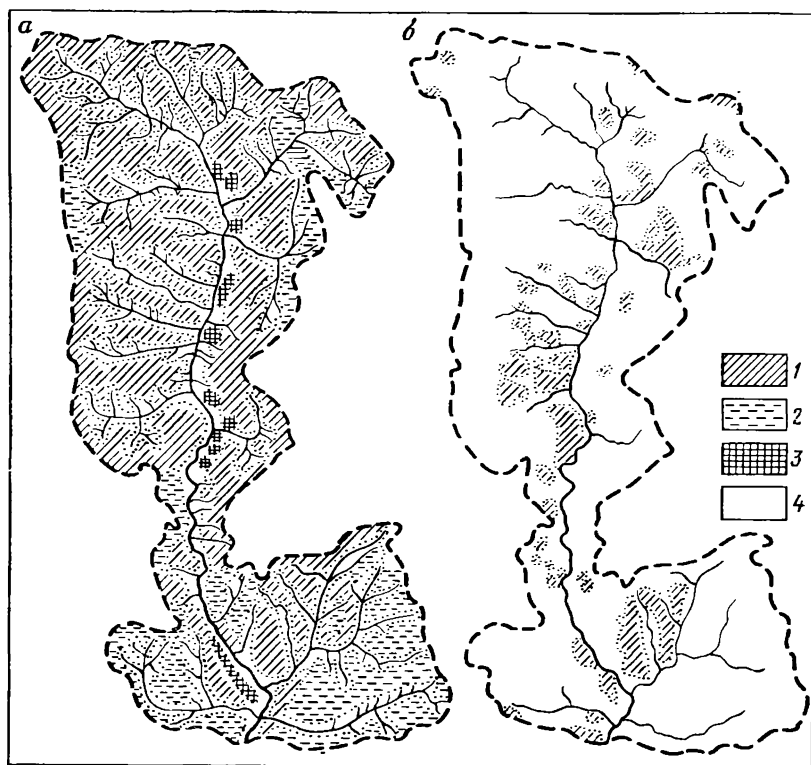


Рис. 7. Бассейн р. Оскол до г. Купянска. *а* — в начале XVII в., *б* — в середине XX в. На рисунке хорошо видно уменьшение протяженности гидросети в результате сельскохозяйственного освоения земель водосбора (по Р. Нежиховскому):

1 — лес; 2 — степь; 3 — береговая растительность; 4 — луга и пашни

Если в несмытом черноземе в верхнем горизонте сумма поглощенных оснований достигает 35,5 ммоль на 100 г породы, то в сильносмывом — 17 ммоль. Уменьшение содержания в поглощающем комплексе кальция и магния ослабляет водопрочность структуры почвы и, тем самым, снижает противоэрозионную устойчивость последней.

Наиболее сильный смыв почвы происходит при ее глубокой культивации, а наименьший — при щелевании зяби.

Щелевание зяби проводится весной до начала периода ливневых дождей, проходящих здесь в мае — начале июня. Существенно снижается эрозия почвы при применении безотвальной вспашки. Так, на склоне крутизной 10° при обычной обработке поля смыв составлял 39,8—57,4 м³/га, а при безотвальной — 4,4—32,6 м³/га.

Аналогичные данные имеются по Южному Уралу — одному из районов активного проявления ускоренной эрозии и дефляции почв. Согласно Д. Д. Миндиярову и Ф. Ш. Гарифуллину, при отсутствии противостоковых мероприятий в условиях лесостепи Предуралья ежегодный смыв с пашни достигает 34,4—52,6 т/га, а в лесостепи Зауралья — до 22—35 м³/га. В различной степени смытые и дефлированные почвы занимают в регионе 45 % площади обрабатываемой пашни.

Как указывают эти же авторы, ускоренная денудация почвенного покрова на Южном Урале очень активна из-за высокой распаханности территории и несоблюдения элементарных требований по защите почв от эрозии. В структуре посева полевые культуры с лучшей почвозащитной способностью (многолетние травы, озимые) принимают незначительное участие. Поля нередко обрабатываются вдоль по склону, что способствует усилению смыва почв. Мало применяются специальные противоэрозионные приемы обработки почв, на сравнительно небольших площадях высеваются кулисы. В расчете на 1 га пашни вносится всего лишь 1—1,5 т органических и 0,5—1,0 ц минеральных удобрений. Защитных лесонасаждений мало — их площадь в лесостепных районах составляет 0,7—1,6 % по отношению к общей площади, а в степных районах — 0,2—0,6 %. В настоящее время с целью контроля над эрозией и дефляцией почв для Южного Урала выработан соответствующий комплекс организационно-хозяйственных и агротехнических мероприятий.

Семиаридные и семигумидные области суббореального пояса являются, как уже указывалось, дефляционноопасными. Именно здесь периодически возникают черные бури.

Как пишет Д. В. Наливкин [25], в степях Казахстана пыльные бури раньше были сравнительно редки. Однако, когда степная целина была распахана, их проявление участилось. В некоторых районах плодоносящей целины через несколько лет после распашки образовались бесплодные песчаные пространства.

С. Попруженко наглядно описал одну из черных бурь, которая имела место на Украине в 1892 г. «Сухой, сильный восточный ветер в продолжении нескольких дней рвал землю и гнал массы песка, земли и пыли. Туча за тучей поднимались клубы земли и, то догоняя, то перегоняя одна другую, сливались в непроницаемую для глаза массу пыли, засекавшей глаза. Ветер выл, грохотал с невероятной силой, срывал на пути все, что могло служить ему препятствием. Посевы, желтевшие от су-

хого воздуха, подрезались под корень, как серпом, но и корни не могли уцелеть: ветер выносил землю с корнем; не щадились и старая сухая сорная трава — и та выкорчевывалась. Земля выносилась до 18 см глубины и обнажалась подпочва; более всего страдали мягкие удобренные поля. Недавно еще зеленевшие нивы превратились в черную избитую равнину, как бы после пожара» [25].

Согласно В. Н. Бабиченко, средняя длительность пыльных бурь в Донбассе 8—9, в степной зоне — 3—6, в Полесье — 1 ч. Наиболее сильные из них длятся до 3—5 дней. Скорость ветра при пыльных бурях достигает 15—20, а в отдельных случаях и 40 м/с, когда они становятся ураганами.

М. М. Жуков изучил общие особенности проявления черных бурь, имевших место в марте — апреле 1960 г. на юге европейской части СССР. В указанный период здесь господствовали восточные и юго-восточные ветры. Высота подъема пыли обычно превышала 1500 м, но была несколько меньше 2000 м. В районе Одессы облака пыли поднимались до 2400 м.

Начавшись в Закаспии, бури в 1960 г. охватили всю южную Украину, распространившись за Одессу. Площадь распространения бурь достигала 100 млн. га, протяженность охваченной ими территории — 3 тыс. км, а количество выдутого и перемещенного чернозема — 25 км³.

Всестороннее исследование предпосылок и геолого-геоморфологических результатов ускоренной дефляции черноземных почв осуществлено Н. И. Маккавеевым с сотрудниками в равнинной части Карачаево-Черкесской автономной области. Здесь преобладают тяжелосуглинистые черноземы, развитые на лесовидных суглинках и глинах. Климатические условия располагают к развитию дефляции в указанном районе. К числу благоприятствующих факторов относятся проявление сильных ветров и суховеев, неравномерное залегание снежного покрова, наличие засушливых периодов в году. Однако главной причиной большого повреждения пахотных и пастбищных земель здесь являются, как указывают Н. И. Маккавеев и соавторы, некоторые особенности сельскохозяйственного производства, приведшие к значительному ослаблению прочности структуры почвы.

К факторам, обуславливающим непрочность структуры пахотного слоя почв в первую очередь относятся: 1) их высокая пылеватость и опесчаненность; 2) значительная карбонатность; 3) температурный режим поверхностного слоя; 4) некоторые особенности обработки, связанные с большим удельным весом пропашных культур в составе посевных площадей.

В холодный период года на незащищенных снегом участках в голых окультуренных почвах за счет многократного (до 120 раз) замерзания и оттаивания происходит весьма существенное сокращение содержания агрегатов крупнее 1 мм — при-

мерно на 20—40 % от их общего первоначального числа в теплый период.

Распылению почвы способствует также подготовка полей к посеву озимых после пропашных культур. Для рыхления глыб, которые образуются при вспашке уплотненной и пересохшей почвы, поля нередко многократно дискусуются, прикатываются тяжелыми катками, что ведет к разрушению структуры пахотного слоя. Почвозащитные свойства последнего также снижаются из-за неудовлетворительного развития озимых в годы с засушливой осенью.

Дефляции почвы в зимнее время способствует корразия — удары о земную поверхность частиц снега, которые становятся весьма твердыми при низкой температуре.

Почвенно-эрозионное обследование в равнинной зоне Карачаево-Черкессии позволило выделить районы сильной, средней и слабой дефлированности почв. При этом выяснилось, что сильно разрушены почвы, обладающие высокой ветроустойчивостью в природном состоянии, и слабее дефлированы почвы с более низкой ветроустойчивостью. Это свидетельствует о главенствующей роли распределения скоростей ветра по площади и значительном ухудшении противоэрозионной устойчивости почв под воздействием сельскохозяйственного производства.

На сильно дефлированных почвах удален их слой мощностью до 26 см, местами до 70 см. Большая часть его была развеяна бурями 1969—1970 гг., которые длились в этом районе до 200 ч и были обусловлены восточными ветрами. Средняя скорость развевания равнялась 1,3 мм/час, или 1,5 т/га·час.

У полезащитных насаждений почвенный покров в полосе шириной 140—180 м, в том числе до 20—30 м с наветренной стороны сохранился практически полностью. Далее к западу от лесополос мощность развеянного слоя быстро нарастает и на расстоянии свыше 300 м заметного влияния от их защиты не обнаруживается. Перед лесными полосами с наветренной стороны на расстоянии 50—100 м, как правило, наблюдается котловина выдувания. Таким образом, при штормовых ветрах дальность защитного действия каждой лесополосы примерно равна $15H$ (где H — высота деревьев). После пыльных бурь 1970 г. озимые сохранились именно на таком расстоянии от лесополос. Районами сильной дефляции были западные скаты водораздельных гряд района.

Средняя по интенсивности дефлированность почв имеет место на плоских водораздельных пространствах в верхних частях склонов восточной экспозиции меридианальных гряд. В таких местах развеян слой почвы мощностью 10—15 см.

Слабая дефлированность (унесено менее 10 см почвенного слоя) характерна для нижних частей восточных склонов и ряда других мест.

Детально изучено Н. И. Маккавеевым и соавторами также и распределение эоловых аккумулятивных форм, возникших после черных бурь 1969—1970 гг. в равнинной Карачаево-Черкессии. Они указывают, что почвенная пыль уносилась на большие расстояния, а более крупный материал откладывался у ближайших препятствий и на подветренных крутых и обрывистых склонах балок и гряд. Большие заносы возникли на правых бортах долин рек Кубани и М. Зеленчука. Были занесены **некоторые поселки**. Значительная доля развеванной почвы (до 30—50 %) отложилась в виде валов в лесных полосах. Объем материала, осевшего у лесных полос, зависел от их конструкции и размеров пылесборной площади, которая пропорциональна расстоянию между лесополосами. В районе сильного проявления дефляции в полосах плотной конструкции и за ними объем отложений на 1 м полосы составил 30—40, 50—70 и 100—110 м³ при расстояниях между полосами 700, 1000 и 1500—2500 м соответственно. В районах умеренной дефляции объем наносов равняется 10—15 м³ на 1 м полосы. У лесных полос ажурной конструкции откладывается меньше наносов. В районе сильной дефляции их объем в среднем равен 10—30 и лишь иногда 50—60 м³ на 1 м полосы.

Форма валов также зависит от конструкции лесополос. У непродуваемых полос ширина валов равняется 150—160 м при высоте 2—3 м. Вал выходит на наветренную сторону полосы, углубляясь в поле на расстояние до 20—30 м. Поверхность вала неровная и без планировки непригодна для сельскохозяйственного использования.

У продуваемых полос поперечный профиль валов плавный и в районах сильной дефляции эоловый материал аккумуляруются в виде небольших бугров возле отдельных кустов и зарослей бурьяна, а также в виде вытянутых кос за стволами деревьев. В местах отсутствия травяного покрова почва выдута и обнажены корни деревьев.

В районах сильной дефляции эоловый материал аккумуляровался и в продольных по отношению к направлению ветра полосах в виде валов мощностью 1,5—2 м (рис. 8).

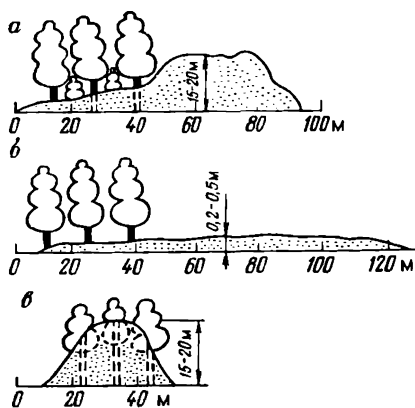


Рис. 8. Эоловые валы в лесных полосах:

а — непродуваемой; б — ажурной; в — продуваемой продольной (т. е. параллельной направлению ветра) (по Н. И. Маккавееву и др., 1972 г.)

Образование эоловых валов нарушило естественные пути стока талых и дождевых вод. Вследствие этого местами происходило затопление пашни, смыв посевов, сток концентрировался вдоль лесополос.

Субтропический пояс. Природно-антропогенные процессы на пахотных землях этого пояса вызывают большой разрушительный эффект даже в странах с высоким уровнем агротехники. Так, в субтропиках востока США находятся большие

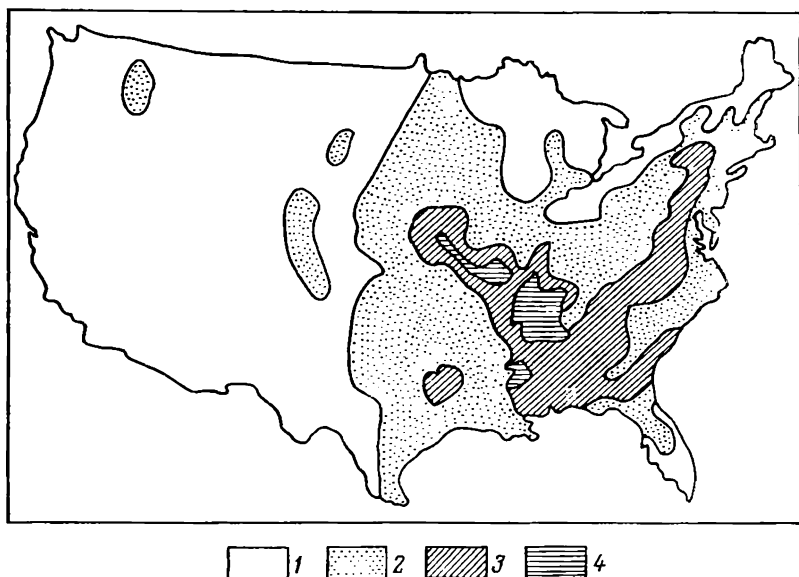


Рис. 9. Схема скоростей плоскостной и ручейковой эрозии почв на возделываемых землях США [46]:

1 — менее 11,2; 2 — 11,2—33,6; 3 — 33,6—56; 4 — более 56 т/га · год

массивы пашни, на которых интенсивность смыва достигает 33,6—56 т/га · год, а на отдельных участках даже более 56 т/га · год (рис. 9).

Сильно денудированы субтропические пашни в Австралии. Как указывает Л. Г. Фролова, в центральных районах Нового Южного Уэльса, где сосредоточена почти вся пахотная площадь штата и 90 % скота, дефляцией и особенно эрозией повреждено 48,3 % площади. С поверхности бывает смыто до 30 см почвенного слоя, широко развита овражная сеть.

Ускоренная эрозия и дефляция пагубно отражаются и на землях субтропиков Восточной Азии, Южной Америки и юго-запада Европы. Однако по этим регионам сколько-нибудь определенными количественными данными автор не располагает.

Тропический лес. В тропических странах замена естественной растительности полями сразу же приводит к мощному проявлению ускоренной эрозии, поскольку энергия тропических ливней в несколько раз выше энергии дождей в умеренных широтах. Широкою известность получили сведения об опустошении, которое произвела эрозия почв на о. Ява в бассейне р. Чиманук. Бассейн находится в западной части острова, имеет площадь 3322 км² и получает 1740 мм годовых осадков. По сообщению С. Партосендохо, после второй мировой войны в горной части водосбора р. Чиманук на площади 177 км² были сведены леса и созданы плантации. Однако при этом так усилился поверхностный смыв с обезлесенных территорий, что резко увеличилась мутность реки и ирригационная сеть, созданная в ее бассейне для нужд производства риса, в короткий срок полностью заилилась и вышла из строя. По мнению экспертов, оценивших масштабы аккумуляции р. Чиманук в дельте, твердый сток этой реки в течение 1948—1969 гг. соответствовал слою снижения земной поверхности в 5,2 мм/год, что эквивалентно модулю твердого стока 6000 т/км²·год. Таким образом, ускоренная эрозия в обезлесенной горной части бассейна реки наверняка достигала сотен тонн почвенного материала с 1 га в год.

Рядом авторов приводятся убедительные аргументы по поводу того, что без принятия противоэрозионных мер возделывание земель в тропиках ведет к их быстрому смыву и образованию бедленда. Е. Рус обобщил данные опытов на 20 станциях Западной Африки. Измерения потерь почв на них показали, что на поверхностях от 0 до 4° с пашни без растительного покрова теряется от 3 до 570 т/га·год, а с пашни под сельскохозяйственными культурами — от 0,1 до 90 т/га·год, тогда как с естественных урочищ в этих условиях смывается от 0,01 до 1 т/га·год.

Учитывая, что нагрузка на землю в развивающихся странах быстро увеличивается, несомненно ускоряется и денудация возделываемых земель в них. Л. И. Куракова отмечает, что уменьшение сроков перелогов при подсечном земледелии теперь приводит к тому, что истощенные после эксплуатации земли не успевают восстанавливаться, вновь вовлекаются в земледельческое использование, после которого они могут превратиться в полностью бесплодные и долго невосстановимые пространства.

К сожалению, сведения об эрозии почв в тропиках слишком отрывочные и скудные. Однако охрана их в странах этого пояса, по-видимому, еще только начинает вводиться, тогда как потери огромны. Л. Браун сообщает, например, что с возвышенностей Эфиопии ежегодно теряется около 1 млрд. т почвенного материала, а в Колумбии такие потери оцениваются цифрой в 0,4 млрд. т и более. Вне всякого сомнения, что «хрупкий» почвенный покров полей большинства тропических стран сейчас

находится в бедственном положении, под угрозой быстрого уничтожения природно-антропогенной денудацией.

Общие данные о потерях почвы

Общие потери продуктивных земель от различных видов ускоренной эрозии и дефляции трудно поддаются оценке. А. М. Рябчиков [30] приводит цифру общей площади антропогенных пустошей в 440 млн. га. Л. И. Куракова, ссылаясь на подсчеты А. Гэррена, указывает, что только за последнее столетие ускоренная эрозия и дефляция разрушили почвенный покров на площади порядка 2 млрд. га.

Более точные цифры имеются для отдельных стран. Так, в СССР, согласно С. И. Сильвестрову (1970 г.), в районах распространения современной природно-антропогенной эрозии расположено 150—160 млн. га пашни (около $\frac{2}{3}$ всей пашни СССР) и 130—140 млн. га естественных кормовых угодий. На этой территории общая площадь в той или иной мере эродированных земель составляет 50—60 млн. га, в том числе 30—35 млн. га смытых почв на пашне, 15—20 млн. га эродированных пастбищ и 4—5 млн. га оврагов (современных размывов). Наиболее подвержены эрозии возвышенности степной и лесостепной зон европейской части СССР, предгорья и нижний пояс гор Средней Азии, Кавказа, Крыма, Карпат, где сосредоточена большая часть всех эродированных и дефлированных земель. Ежегодный смыв почв на наиболее эрозионноопасных участках, как указывает тот же автор, достигает десятков кубометров с одного гектара, а при сильных ливнях на чистом пару или пропашных культурах иногда и сотен кубометров. По ориентировочным подсчетам, ежегодно площадь оврагов увеличивается не менее чем на 100 тыс. га, а очень сильно смытых «бросовых» земель — не менее чем на 200 тыс. га. Общая площадь почв, подверженных ускоренному смыву, увеличивается ежегодно на 1 млн. га. В последние годы в СССР усиливаются меры по контролю над эрозией и дефляцией почв.

Показательные данные имеются и для территории США. Они интересны тем, что свидетельствуют о чрезвычайной уязвимости поверхностной части земной коры на быстрое, массовое и во многом стихийное антропогенное воздействие.

Развитие ускоренной денудации на сельскохозяйственных землях США имеет короткую, но поучительную историю. Всего каких-нибудь 300 лет назад большая часть территории США могла считаться практически девственной, столь мало и незначительно было ее изменение человеком. Североамериканские индейцы не имели металлических орудий, у них не было домашнего скота, лошадей, это были в подавляющем большинстве собиратели, охотники и рыболовы, и лишь на крайнем юге практиковалось в незначительных масштабах земледелие. Появление

белых переселенцев резко изменило ситуацию. Захват земель ими осуществлялся очень быстро. Этому во многом благоприятствовала официальная политика федерального правительства США, которое стремилось привлечь на слабозаселенные государственные земли к западу от Миссисипи новых поселенцев. Так, по закону 1862 г. фермеры и скотоводы получали право на владение 62 га земли при условии добросовестного использования ее в течение 5 лет. Подобное законодательство привело к тому, что многим фермерам оказалось выгоднее приобретать новые земли, чем пытаться сохранить и приумножить плодородие своих угодий. Многие колонисты быстро подняли «выгоду политики «выжимания» из земли всех ресурсов до последней капли». Формируется огромное количество так называемых «чемоданных ферм», когда поселенцы строят временные жилища и, «сидя на чемоданах», ждут, когда же земля наконец истощится, чтобы быстро переехать на новое место. По образному выражению Р. Парсона (1969 г.), «движение колонистов на Запад сопровождалось столь же колоссальным истреблением природных ресурсов, сколь колоссальным было само движение».

Естественно, что такое положение не могло продолжаться долго. Подобное насилие над землей должно было привести и привело к настоящей трагедии. Этому способствовал ряд природных особенностей. В США при движении с востока на запад, к Великим равнинам, происходит уменьшение количества осадков, что приводит к смене лесов на степи. Здесь часты сильные ветры, а почвы рыхлые, легко развеваемые. Кроме того, для этих районов характерны периодические засухи. Бурное освоение степных пространств в начале XX в., которому способствовала первая мировая война, пришлось на влажный период, за которым последовала сильная и продолжительная засуха 1926—1931 гг. Вслед за ней началась грандиозная по своим масштабам дефляция, охватившая огромные смежные площади земель в штатах Канзас, Колорадо, Оклахома, Техас и Нью-Мексико, именуемые «пыльной чашей». Золотое разрушение почв достигло апогея в 1934—1935 гг.

Разрушительный эффект пыльных бурь, обрушившихся в тот период на равнины юга США, был огромен. Достаточно сказать, что только один сильный шторм поднял в воздух 300 млн. т верхнего, наиболее плодородного слоя почвы, что было равносильно полной ликвидации 3000 ферм площадью по 40 га каждая. Практически в полную негодность пришло около 36 млн. га земли. Это стихийное бедствие, нанесшее огромный материальный ущерб, было исключительно наглядно и поучительно. Настоятельно требовались срочные и неотложные меры, так как громадное развитие получили не только ветровая, но и водная эрозии почвы, и почвенный покров был существенно нарушен практически во всех восточных штатах страны. Пыльные бури начала 30-х годов были лишь последним сигналом к принятию

экстренных мер по борьбе с эрозией и дефляцией почв на пахотных угодьях и пастбищах.

Американцы, понеся огромные убытки от эрозии и дефляции почв, этих стихийных бедствий, созданных своими же руками, сумели не только привлечь внимание всего мира к их феномену, но и в сравнительно короткие сроки провели инвентаризацию своего земельного фонда, развернули исследования причин и последствий разрушения почвенного покрова, выработали систему противоэрозионных мероприятий, наладили количественный учет потерь почвы на различных типах земель и в первую очередь на культивируемых полях.

В 1935 г. в США была организована Служба охраны почв, действующая и поныне. Обследование, проведенное в период ее создания, показало, что состояние земель США является более чем тревожным. От 25 до 75 % верхнего слоя почвы было удалено с площади 256 млн. га. На части эродированных земель площадью 135 млн. га произошло сильнейшее оврагообразование. В области Великих равнин и ряде других мест — в целом на площади 129 млн. га господствовала дефляция, из-за которой 36 млн. га стали полностью непригодны для земледелия, а 32 млн. га пострадали очень серьезно.

Меры по контролю над эрозией и дефляцией, разработанные Службой охраны почв США, не являются обязательными для фермеров и поэтому далеко не все они участвуют во внедрении ее программ. В результате этого ускоренная эрозия и дефляция продолжают причинять серьезный урон полям во многих штатах. Оценки различных экспертов по поводу масштабов ущерба расходятся. Так, Т. Барлоу указывает, что вследствие широкого применения зяблевой вспашки и значительного использования земли под монокультуру кукурузы в настоящее время ускоренная эрозия на пашне распространена шире, чем в 1934 г., причем на 75 % ее площади смыв превышает норму. В сельскохозяйственном штате Айова в 1974 г. зафиксирована самая сильная эрозия за последние 25 лет — многие поля потеряли от 88 до 110 т/га почвы. Согласно другим источникам еще более значительной в этот же год была эрозия почвы на многих полях штатов Теннесси (200 т/га) и Вашингтон (350 т/га). О масштабах современной эрозии почв на пахотных угодьях США хорошее представление дает карта (см. рис. 9).

В США осуществляют подсчеты смыва и дефляции почвы с пахотных угодий и земель другого типа. По данным Sedimentation engineering [49], только за счет плоскостной и речевой эрозии с пашни в период с конца 60-х — начала 70-х годов терялось около 2,2 млрд. т почвы. По данным Congressional record от 16 мая 1977 г., в западных районах США ускоренная дефляция удаляет до 1 млрд. т почвенных частиц с пашен и пастбищ. Более скромные оценки содержатся в Environmental quality за 1979 г. Согласно этому источнику, в 1977 г. на нефе-

деревянных пахотных землях плоскостная и ручейковая эрозия удаляла около 1,8 млрд. т почвы, а дефляция — 0,8 млрд. т. Средние скорости природно-антропогенной эрозии и дефляции, согласно этому источнику, составляли соответственно 10,5 и 11,6 т/га·год, диапазон изменения средних скоростей по отдельным штатам оценен в 1—32 т/га·год для эрозии и в 0—33 т/га·год — для дефляции. Следует отметить, что эти оценки не вполне увязываются с данными карты скоростей современной плоскостной и ручейковой эрозии на пашне США (см. рис. 9) и отличаются от показанных на ней в меньшую сторону. Так или иначе, вся информация, даже не совсем согласующаяся между собой по количественному определению масштабов, скоростей и результатов проявления природно-антропогенной эрозии и дефляции, свидетельствует о колоссальной активизации механического сноса с пахотных угодий и, следовательно, о быстром снижении естественного плодородия почв, наиболее пригодных для сельского хозяйства территорий. Следует учесть, что данный вывод прозвучал бы еще резче, если бы имелись суммарные количественные показатели ускоренной эрозии и дефляции почв по странам Азии, Африки, Центральной и Южной Америки.

Рассмотрение земледельческих мероприятий и их последствий свидетельствует о том, что с этим типом хозяйственной деятельности связаны разнообразные экзодинамические процессы-следствия. В настоящее время сельскохозяйственные поля стран мира подвергаются, хотя и в разной степени, ускоренной антропогенной и природно-антропогенной денудации и являются едва ли не основными поставщиками обломочного материала и некоторых других загрязняющих веществ, которые поступают в атмосферу, поверхностные и отчасти подземные воды.

Выпас

Антропогенные процессы

Выпас скота осуществляется почти во всех природных зонах, но особенно широко он практикуется в полупустынях, пустынях и сухих саваннах, т. е. там, где недостаточно влаги для развития неорошаемого земледелия [21]. В середине 70-х годов количество домашнего скота достигло 3 млрд. голов, из которых 1—1,5 млрд. голов находилось в аридных областях [15]. В 1977 г. выпас осуществлялся на площади свыше 3 млрд. га.

Наряду с пастьбой скота на естественных пастбищах, в Европе, Северной Америке и Австралии широкое распространение получило создание культурных пастбищ. При этом осуществляется поверхностное и коренное улучшение территории. Первое включает осушение переувлажненных участков, расчистку от кустарников и мелкоколесья, корчевание пней, выравнивание по-

верхности, противоэрозионные работы, внесение удобрений и микроэлементов, борьбу с сорняками, уход за дерниной, подсев трав. Коренное улучшение — это создание сеяных сенокосов и пастбищ. Природный травостой перепаживается, в обрабатываемую почву высеваются травосмеси и многолетние травы. Широкое внедрение получило также обновление культурных пастбищ без перепашки с помощью специальных гербицидов и культиваторов [21].

В США разработаны нормы выпаса животных и приемы его рационального осуществления. В сильно засушливых районах США допускается пастба 0,21–0,25 головы крупного рогатого скота на 1 га, а в слабо засушливых — 0,7–0,8 и в нормально увлажненных — 1,2–1,3. В Западном Техасе в последние годы применяется особая система выпаса. В пределах крупных ранчо территория разбивается на несколько пастбищ, каждое из которых интенсивно используется обычно в течение срока от 15 до 45 дней. После этого пастбище «отдыхает» 4–6 месяцев и становится опять пригодным для интенсивного выпаса. Применение этой системы использования пастбищ позволяет увеличить нагрузку на них. Это свидетельствует о том, что последствия большой, но эпизодической нагрузки, создаваемой при выпасе скота, быстро ликвидируются, когда для восстанавливающих пастбище природных биогео-эволюционных процессов выделяется достаточное время. Эффективными в этих условиях являются такие методы, как подсев или посев трав.

Меры по сохранению и увеличению плодородия пастбищ необходимы из-за значительных масштабов выноса вещества с забираемых ими участков в результате проявления антропогенных и природно-антропогенных процессов. Однако далеко не везде эти процессы удается контролировать в необходимых человеку пределах.

Разительным примером нарушения баланса веществ в пастбищных ландшафтах является стравливание древесных растений козам в ряде стран. Например, в штате Раджастан (Индия) пастухи, вооруженные серпами, прикрепленными к шестам длиной до 6 м, срезают с единично растущих деревьев листья, и те падают на землю и поедаются козами и овцами. Деревья погибают от этого, что в засушливых условиях приводит к огромному экологическому ущербу.

Во многих развивающихся странах ухудшению состояния пастбищ способствует и то, что их население широко использует в качестве топлива кизяк, выводя из биологического круговорота пастбищных земель важную составляющую, работающую на их восстановление. «Хотя точная статистика отсутствует, — указывает Л. Браун, — вероятно, доля людей, употребляющих в качестве топлива для приготовления пищи коровий помет, значительно превышает ту часть человечества, которая использует для этого природный газ» [3].

Одна корова производит в сухой массе около 15 т экскре- тов в год, в составе которых содержится 20—30 % углерода, 0,4 % азота и 0,05—0,1 % фосфора. Перегруженные пастбища (1—2 головы крупного рогатого скота на 1 га) ежегодно могут терять при сжигании навоза десятки килограммов азота и не- сколько меньше фосфора. Это почти столько же, сколько теряют поля при снятии с них среднего урожая. Обычный ежегодный вынос из почвы биогенных элементов с пастбищ, по П. Дювиньо и М. Тангу, определяется несколько меньшими цифрами (табл. 14).

Т а б л и ц а 14

**Ежегодный вынос из почвы питательных веществ
в результате выпаса скота, кг**

Масса одного животного, кг	N	P	K	Ca
Бык, 600	16	5	1	9
Овца, 70	1,6	0,5	0,1	0,6

Наиболее значительные изменения имеют место на нелесных пастбищных землях. Перегрузка травянистых ландшафтов многочисленными пасущимися животными, непомерно большое и безвозвратное отчуждение животной продукции приводят, как указывает В. А. Ковда, к деградации растительности, уничтожению дернины и разрушению самой почвы.

Б. А. Быков выделяет в изменении травянистых пастбищ следующие основные фазы: 1) угнетения некоторых разнотравных растений; 2) установления пастбищного травостоя, в котором преобладают корневищные злаки и появились сорные виды; 3) сбоя с оголением участков почвы и распространением непродуктивных эфемеров и сорняков.

Последствия перевыпаса в различных природных условиях изучены неодинаково. Наименьшее число данных имеется для тундровых, тундрово-лесных и лесных пастбищ.

Тундровые и тундрово-лесные пастбища, находящиеся, как правило, в пределах криолитозоны, используются для оленьих стад. Пастьба вызывает сильные изменения в растительном покрове пастбищных угодий криолитозоны. Местами происходит его стравливание, особенно значительное на зимних пастбищах.

Лесные пастбища, широко используемые в умеренном поясе, при перегрузке, по-видимому, испытывают нечто похожее на последствия от вытаптывания при рекреации. Об этом свидетельствуют данные, полученные при исследовании лесных пастбищ США. Изучая изменение скорости инфильтрации почвы

в лесах, где осуществлялся выпас, У. Механ и У. Платс установили, что на участках с большой, умеренной и незначительной нагрузками (около 5; 6,5 и 9 га на 1 голову крупного рогатого скота) инфильтрация соответственно была в 5, 3 и 2,5 раза меньше, чем на контроле.

Лесостепные и степные пастбища. Исследования, проведенные на пастбищах этого типа в Советском Союзе, показали, что усиление пастбищных нагрузок ведет к уменьшению наземной массы растений и увеличению подземной, снижаются запасы подстилки (табл. 15).

Таблица 15

Масса фитомассы и подстилки (ц/га) на степных пастбищах с различной нагрузкой (по Р. И. Злотину с соавторами)

Виды органического вещества	Заповедная степь	Пастбища	
		умеренно выпасаемые	интенсивно выпасаемые
Зеленая масса *	25	15	10
Корни	106	108	137
Подстилка	51	13	9

* Включая зеленые части, отмершие в текущем году.

Избыточная пастьба приводит к уплотнению почвы и изменению ее физических свойств (табл. 16).

Таблица 16

Изменение физических свойств почвы при ее различной глубине под влиянием выпаса за 10 лет [21]

Интенсивность выпаса	Плотность, %		Порозность, %	
	0—5 см	5—15 см	0—5 см	5—15 см
Умеренный	5	2	2,4	0,1
Сильный	7	4	4	2,6

При умеренном и чрезмерном выпасе пастбище переходит в сбой, его поверхность оголяется и на ней поселяются малопродуктивные эфемеры, эфемероиды, малолетние сорняки.

Полупустынные и пустынные пастбища. Нарушения, вызываемые при избыточной пастьбе в песчаных пустынях, изучены В. И. Костюковским в пределах некоторых среднеазиатских пастбищ. В пределах последних им выделены типы

участков в зависимости от характера и величины нагрузки. Эти типы таковы: 1) площади пустынь с рассредоточенным выпасом, на которых умеренная нагрузка не вызывает нежелательных последствий; 2) участки постоянного скотопргона и выпаса, на которых в результате усиленной пастбищной нагрузки образуются многочисленные скотопргонные тропы, являющиеся очагами дефляции; 3) кольца разбитых песков, в пределах которых многочисленные тропы сливаются, образуя глубокие и широкие желоба. От первоначальной поверхности сохраняются бугры-останцы с растительностью; 4) кольца оголенных и разрыхленных песков, окружающих большую часть колодцев, зимовок, поселков; 5) стоянки скота (тырло) — покрытые навозом ровные площадки. Выделенные типы участков имеют размеры от нескольких сотен квадратных метров до сотен гектаров.

Если превращение пустынных пастбищ с песчаными почвами в подвижные дюны может произойти всего в 2—3 года, то восстановление растительности на них осуществляется за 15—20 лет.

Уязвимость аридных пастбищ при их перегрузке — причина трансформации географических условий на суше в пределах значительных ее частей. Избыточная пастьба — главная причина так называемой антропогенной аридизации, представляющей собой прогрессивное расширение ряда крупнейших пустынь суши. Несколько меньшую роль в этом играет земледелие.

По данным Е. Экхольма, в середине 70-х годов области пустынного климата суши занимали 36,3 %, а пустынные почвы и растительность 43 %. На антропогенные пустыни приходится 6,7 % поверхности суши, т. е. приблизительно 1 млрд. га.

Ежегодно пустынные территории возрастают на 6—7 млн. га. Такое стремительное их разрастание связано с очень значительным приростом населения в развивающихся странах и, в частности, на аридных территориях. Отсюда быстро увеличивается и поголовье скота. За период с середины 60-х до середины 70-х годов оно приблизительно утроилось.

Горные пастбища. Избыточная пастьба вызывает серьезные негативные изменения и на высокогорных пастбищах. Как указывают Л. Г. Горчарук с соавторами, в результате перевыпаса на отдельных высокогорных пастбищах Северного Кавказа произошла смена первичной растительности с обилием злаков сорным разнотравьем, местами вытоптан травостой и разрушена структура почвы, особенно перегнойно-аккумулятивного горизонта.

Согласно Р. Джанпейсову с соавторами, перевыпас на травянистых горных пастбищах Казахстана вызывает следующие изменения: 1) разрыв, срыв и обваливание дернины; 2) уплотнение, распыление, увеличение каменистости, уменьшение содержания гумуса и влагоемкости почвы; 3) уменьшение общей массы корней.

Уязвимы к большим нагрузкам и горно-лесные пастбища. На некоторых лесных склонах Западного Тянь-Шаня выпас скота приводит к такому уплотнению поверхностного слоя почвы, что ее водопроницаемость становится в среднем в 10 раз меньше интенсивности наиболее сильных ливней. Кроме того, как пишут К. С. Ботман и А. Ю. Телляев, происходит стравливание травянистой растительности и разрушение лесной подстилки.

На горных полупустынных и пустынных пастбищах пастба сверх установленной нормы приводит к таким нарушениям почвенно-растительного покрова, в результате которых дополнительно возрастает уязвимость почвы к эрозии и дефляции.

Природно-антропогенные процессы

Тундровые и тундро-лесные пастбища весьма чувствительны к перевыпасу. Однако возникающие на них природно-антропогенные процессы изучены еще очень слабо. Разреженный, но выполняющий важную теплоизолирующую роль растительный покров нужно поддерживать в хорошем состоянии. Там же, где происходит его стравливание, осуществляется чрезмерное таяние грунтов, интенсифицируются термокарстовые явления и солифлюкция, возникают и бурно протекают делювиальный смыв и намыв, а также овражная эрозия.

Лесные пастбищные земли при перевыпасе обычно становятся ареной развития делювиального смыва. В отдельных местах возникают небольшие промоины. Климатические условия лесных пастбищ благоприятствуют быстрому выносу с водным стоком продуктов размыва экскретов пасущихся животных. В связи с этим в некоторых районах у небольших водотоков отмечено повышенное содержание аммиака и увеличение БПК.

Лесостепные и степные пастбища. Для этих пастбищ имеются данные о снижении содержания гумуса в черноземах под воздействием перевыпаса. Согласно Р. И. Злотину с соавторами, многолетний интенсивный выпас лошадей в целинной степи снизил запасы гумуса в почве на 20 %. Всюду, где выпасаемые степные территории имеют разреженный травянистый покров, они подвергаются энергичному делювиальному смыву и дефляции. Резкое усиление механического сноса с поверхности почв происходит сразу же, как только их проективное покрытие становится менее 70 %.

Сильная дефляция имеет место на песчаных пастбищах в штате Небраска (США). М. Малакути с соавторами опубликовали данные о дефляции и эоловой аккумуляции в прериях на западе и севере этого штата. Несмотря на попытки контроля над дефляцией путем высевания трав даже при их быстром развитии выдувание существенно колебалось в зависимости от вида травянистого растения, формировавшего защитный противодеф-

ляционный покров, в интервалах от 516 до 1243 т/га за период с апреля 1976 г. по май 1977 г. Сопряженная с этим процессом эоловая аккумуляция имела тоже большие масштабы: от 286 до 549 т/га. Высокая податливость почв к дефляции объясняется их тонкопесчаным составом, очень низким содержанием гумуса (0,2 %) и рядом других особенностей.

Пастбища травянисто-кустарниковой саванны. Природно-антропогенные процессы на этих пастбищах были недавно изучены в Кении и Танзании. Т. Данне с соавторами исследовали семиаридные травянисто-кустарниковые и травянистые пастбища Кении, которые занимают в этой стране низменные территории, образованные пологосклонными холмами (крутизна склонов 3° и менее). Почвы региона суглинистого состава. Их мощность колеблется от 0,5 до 2 м. Субстратом являются докембрийские метаморфические породы и кайнозойские лавы.

Современные темпы механического сноса с участков с незначительной пастбищной нагрузкой колеблются от 0,5 до 1,4 т/га·год. Однако в 20—40 км к югу от Найроби и в ряде других мест из-за перевыпаса поверхностный смыв со склонов увеличился и колеблется от 20 до 180 т/га·год.

Широкое проявление природно-антропогенного механического сноса с семиаридных водосборов Кении продолжается около 20 лет. Начиная с 1961 г. модули взвешенных наносов рек, дренирующих районы сильного перевыпаса, намного увеличились. Т. Данне и соавторы указывают, что они колеблются от 108 до 20 000 т/км²·год.

Результаты наблюдений в Кении совпадают с данными по Танзании, в пределах которой, согласно А. Раппу, семиаридные пастбища ежегодно теряют в результате природно-антропогенного поверхностного сноса слой почвы мощностью около 1 см. Беспрецедентно быстрые темпы разрушения почвенного покрова в пределах семиаридных пастбищ Африки могут привести к полному уничтожению маломощного поверхностного чехла уже через несколько сотен лет, а местами всего через 200 лет.

Полупустынные и пустынные пастбища. Процессом, происходящим на аридных пастбищах, в настоящее время уделяется особое внимание. Установлено, что нарушенные почвы при увлажнении сильно набухают, а при иссушении растрескиваются. По мнению В. А. Ковды, это связано с новообразованием в них набухающих минералов (сметитов) — коллоидных соединений кремнезема. На оголенных почвах в засушливых районах усиливаются процессы выпота, что приводит к их быстрому засолению. Засоление пастбищ — типичное явление в континентальных секторах умеренного и субтропического поясов [21].

По мере того как сверху почва подвергается смыву и дефляции, уплотнение распространяется на более глубокие горни-

зонты почвенного профиля. Длительный перевыпас заканчивается полным истощением почвы.

На песчаных пастбищах пустынь, как указывает В. И. Костюковский, главную роль играют дефляционно-аккумулятивные процессы. Очагами дефляции служат скотопрогонные тропы и крупные скотосбоя в местах их схождения. Отрицательные дефляционные природно-антропогенные формы рельефа сочетаются с аккумулятивными, например с барханами.

Аридные пастбища и в природных условиях подвергаются воздействию плоскостного смыва, эрозии, дефляции и др., хотя почвенно-растительный покров снижает масштабы механического сноса. Однако когда этот покров подвергается антропогенному нарушению, то интенсивность механического разрушения возрастает и иногда принимает катастрофические размеры.

Нормальная величина дефляции, согласно М. Е. Бельгибаеву, обычно исчисляется цифрами 2—3 т/га·год. Но в годы повышенной ветровой активности дефляция пашни и сильно нарушенных перевыпасом земель может достигать 300—400 т/га·год. Пыльные бури, продолжающиеся несколько дней, способны унести слой почвы в 15—20 см, разрушить поля и уничтожить посевы на площади в десятки и даже сотни миллионов гектаров [15].

Измерения показывают, что обычно деятельность ветра уступает масштабам поверхностного смыва с нарушенных пастбищ и земледелием аридных земель. Например, на территориях, обрамляющих Сахару с севера, дефляция оценивается в 10 т/га в месяц, а поверхностный смыв в 200—250 т/га·год.

Высокогорные пастбища. Наблюдения на высокогорных пастбищах Северного Кавказа показывают, что несмотря на их хорошее состояние в отдельных наиболее нарушенных скотом местах бывает полностью смыт гумусовый слой. На месте скотопрогонных троп на склонах имеются промоины глубиной до 1,5—2 м и шириной 3—5 м.

Горно-лесные пастбища. Весьма ощутимо перевыпас влияет и на процессы в лесном поясе гор. Так, в редкостойных лесах Западного Тянь-Шаня, как указывают К. С. Ботман и А. Ю. Телляев, выпас скота приводит к усилению поверхностного стока и снижению порога скорости поверхностных вод, при которой начинается разрушение почвы смывом воды. В выпаваемых лесах водопроницаемость почв в 10 раз ниже интенсивности сильных ливней.

Горно-лесные пастбища с сосново-можжевелевой растительностью изучались П. Каррара в бассейне р. Пициана штата Колорадо (США). Крутосклонные горные массивы сложены относительно не сильно литифицированными осадочными породами. Темпы смыва, осуществляемого здесь талыми водами и летними ливнями (годовая сумма осадков всего 300 мм), по данным «корневого» метода в течение последних 400 лет увеличивались. На склонах южной экспозиции 300 лет назад снижение поверх-

ности шло со скоростью 0,22; 200 лет назад — 0,33; 100 лет назад — 0,49 и в последнее столетие — 1,79 мм/год. В настоящее время смыв достигает 2,40 мм/год. На склонах северной экспозиции, лучше защищенных растительностью, смыв идет примерно вдвое медленнее. Усиление денудации склонов в последние 100 лет связано с выпасом скота.

Горно-степные пастбища. Проявление эрозионных процессов на них местами отличается высокой интенсивностью. Наблюдения Г. А. Ларионова на Северном Кавказе показывают, что при значительном разрежении растительного покрова делювиальным смывом удаляется почвенный мелкозем и наиболее перегруженные пастьбой участки оказываются покрыты чехлом щебня или представляют собой обнаженную плиту скальных пород.

Большие площади земель, почти лишенные почвенного покрова, встречаются в поясе степной растительности и выше на склонах южной и восточной экспозиций. Щебенистые осыпи или скалы занимают указанные склоны в пределах Пастбищного хребта и местами на хребте Скалистом. Столь интенсивное развитие здесь эрозионных процессов объясняется следующими причинами: 1) неудовлетворительными почвозащитными свойствами степной растительности, 2) близким залеганием скального субстрата, 3) значительной крутизной склонов, 4) плохой организацией выпаса и перегрузкой пастбищ.

Слабее проявляется эрозия, связанная с перевыпасом, на выровненных вершинах Пастбищного и Скалистого хребтов, что объясняется наличием незначительных уклонов и хорошими почвозащитными свойствами растительности. Размыв имеет место здесь только на небольших участках возле водопоев, кошар, мест дойки и скотопрогонов. Во многих случаях очагами развития эрозии служат временные дороги, многократно прокладываемые за сезон к летникам, кошарам и фермам.

Овражная эрозия, осуществляющаяся из-за перевыпаса, сильнее всего проявилась на крутых склонах крупных речных долин, преимущественно в местах пересечения последними Скалистого и Пастбищного хребтов. Здесь находятся три массива овражных земель. На каждом из них имеются донные овраги в днищах ложбин и балок и склоновые овраги. Овражное расчленение оврагами второго типа столь значительно, что это привело к образованию участков бедленда. В зависимости от мощности рыхлых отложений глубина оврагов колеблется от 2 до 17 м.

Помимо ускоренной эрозии горно-степные пастбищные земли Северного Кавказа подвергаются разрушению ветром. Так, на склонах Пастбищного хребта установлено развевание почвы на глубину до 10 см.

Горно-пустынные пастбища. Показательные данные получены Г. Ласби при изучении природно-антропогенных процессов на горных пустынных пастбищах в бассейне р. Колорадо

(район г. Гранд Джакшен, шт. Колорадо). Пастбища занимают вершины и склоны холмов на правом берегу р. Колорадо. Холмы крутосклонные, выработаны в верхнемеловых породах — аргиллитах и песчаниках. Осадки (220 мм в год) выпадают в основном в виде ливней.

Наблюдения велись 14 лет на четырех парах выбранных участков. Каждая пара была представлена участком, где как обычно продолжали пасту крупный рогатый скот и овец, и участком, куда доступ скоту был прекращен. Различия между характеристиками эксплуатируемых и неэксплуатируемых участков четко проявились через три года. На участках, где выпас был прекращен, поверхностный сток в среднем был на 30 % меньше, чем на эксплуатируемых. Модуль механического сноса с них соответственно равнялся 14,3 и 20,9 т/га·год. Оба показателя во много раз превышают норму природного сноса (менее 0,2 т/га·год) с ненарушенных естественных урочищ изученного района.

Чрезмерная эксплуатация пастбищных земель и, в частности аридных пастбищ, имела место в США до середины 30-х годов, после чего она была ограничена законодательным путем. Поэтому, как указывает Р. Хэдли, в период с 1941 по 1955 г. в бассейне р. Колорадо число коз и овец на пастбищах уменьшилось на 750 тыс. голов. В значительной мере скот был переведен на стойловое содержание. Эти мероприятия в совокупности с некоторыми другими противозерозионными мерами стали причиной очень значительного снижения механического сноса с аридных водосборов указанного бассейна. Об этом свидетельствуют приводимые Р. Хэдли данные о водном и твердом стоках р. Колорадо в периоды бесконтрольного и ограниченного выпасов (табл. 17).

Таблица 17

Среднегодовые расходы воды и взвешенных наносов в створах четырех станций в бассейне р. Колорадо

Наименование реки и станции	Период наблюдений, гг.	Расходы воды, км ³ /год	Расходы взвешенных наносов, млн. т·год	Период наблюдений, гг.	Расходы воды, км ³ /год	Расходы взвешенных наносов, млн. т·год
р. Колорадо, Циско	1930—1942	6,34	17,3	1943—1962	6,17	8,7
р. Колорадо, Гранд-Каньон	1926—1941	15,46	177,3	1942—1960	14,5	86,4
р. Грин-Ривер, Грин-Ривер	1930—1942	4,49	22,1	1943—1962	5,2	15,1
р. Сан-Хуан, Блафф	1930—1942	2,43	41,7	1943—1962	1,88	15,9

Из приведенной таблицы видно, что вынос взвешенных наносов по р. Колорадо уменьшился примерно вдвое после принятия мер по ограничению выпаса при незначительном снижении водности реки. Сходные изменения произошли с водным и твердым стоками двух крупных притоков р. Колорадо — Грин-Ривер и Сан-Хуан.

Таким образом, в верхнем течении р. Колорадо избыточная пастба в пределах водосборных ПЭЖ оказывала большое влияние на процессы на дне долин. По существу, как это будет подробнее рассмотрено ниже, перевыпас сказывался на функционировании всей бассейново-речной экзодинамической системы р. Колорадо.

Учитывая то, какую огромную площадь суши в сумме занимают пастбища, а также сведения о росте нагрузки на них во многих странах, экзодинамический эффект выпаса скота можно считать очень значительным. Недаром в первую очередь из-за перевыпаса происходит разрастание Сахары и ряда других пустынь мира.

РЕКРЕАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ И ИХ СЛЕДСТВИЯ

Рекреационному использованию подвергаются огромные участки суши, особенно в развитых странах. Например, в СССР для отдыха выделено 14,6 млн. га, из которых 12,7 млн. га представляют собой лесопокрытую территорию. В США под рекреацию отведено около 27 млн. га.

Рекреационное воздействие на земную кору проявляется в местах массового отдыха людей. Негативные последствия от избыточных рекреационных нагрузок относительно неплохо изучены в лесопарковых зонах вокруг городов. Некоторые сведения имеются в отношении аридных территорий.

Антропогенные процессы

Антропогенными процессами-мероприятиями в лесопарковых зонах являются: прогулки людей, расчистка и использование площадок для отдыха, спорта, разведение костров*, заезд по бездорожью на автотранспорте и ряд других. В результате большинства из них происходит вытаптывание местности, с которым связаны негативные антропогенные изменения растительного покрова и почвы.

Специальные измерения показывают, что давление ноги неподвижного человека близко к $0,2 \cdot 10^5$ Па, тогда как при его движении нагрузка может доходить до $47 \cdot 10^5$ Па [48].

В зависимости от силы воздействия человека на лесную растительность происходит ее дигрессия, которая подразделяется

* Костер на 5—7 лет полностью выводит из строя клочок земли, на котором он был разложен.

на стадии. За I стадию принят ненарушенный лес, а II—V стадии обозначают различные степени его дигрессии.

Примером дигрессионных изменений лесной растительности под воздействием рекреационной нагрузки могут служить данные наблюдений В. Ф. Бибикова и соавторов в Заславском лесопарке пригородной зоны г. Минска. Отдыхающие охотнее посещают в нем сосняки мшистые и черничные. На II стадии дигрессии этих лесов влияние человека невелико: мощность подстилки достаточно высока, тропинки редки и занимают всего 5,3 % их площади, нарушение целостности напочвенного покрова только начинается. На III стадии уже намечается сеть тропинок, появляются кострища и отдельные вытопанные площадки. В сосняке мшистом их площадь достигает 12,8 %. Мощность подстилки снижается и сильнее нарушается целостность напочвенного покрова. На IV стадии дигрессии наблюдается сплошная сеть тропинок, грунтовых дорог, вытопанных площадок, много кострищ, мусора. Напочвенный покров сохранился отдельными пятнами. Вытопанные участки в сосняке мшистом занимают 22,4 % площади. Почва сильно уплотнена.

На V стадии напочвенный покров имеет фрагментарный характер. Небольшие пятна трав занимают места вокруг деревьев. Лишенные травянистой растительности участки в сосняке мшистом занимают 81,9 %. Почва утрамбована, как на спортивной площадке.

Средняя твердость почвы в перегнойном горизонте на II стадии дигрессии сосняка черничного составила 8,8, III — 12,1, IV — 16,3 и V — 19,3 кг/см². Таким образом, с возрастанием рекреационной нагрузки плотность почвы увеличилась более чем в два раза.

Влияние вытаптывания на почвы более детально рассмотрено в другой работе [48]. Главными изменениями, происходящими в этом случае с почвами, являются: 1) частичное или полное уничтожение подстилки; 2) снижение содержания гумуса; 3) нарушение структуры до глубин 10—30 см, ведущее к снижению порозности, воздухоемкости, капиллярной влагоемкости и увеличению объемной массы; 4) ухудшение условий обитания и полезной жизнедеятельности почвенных организмов; 5) уменьшение запасов влаги; 6) увеличение глубины промерзания; 7) уменьшение скорости инфильтрации дождевых и талых вод.

Изменение физических свойств почв при рекреационном использовании территорий происходит обычно уже в течение двух лет. В ненарушенных лесах объемная масса почвы вблизи поверхности равняется 0,85—0,88 г/см³, а в сильно нарушенных лесах, на тропах и грунтовых дорогах 1,61—1,63 г/см³. На вытопанных площадках и магистральных тропах, помимо полного уничтожения подстилки, мощность верхнего гумусового горизонта почвы может снижаться на $\frac{2}{3}$.

Вытаптывание приводит также и к прямому разрушению растительного покрова, что отчасти видно из вышеприведенного примера по Заславскому лесопарку. На последних стадиях дигрессии в лесах исчезают почти полностью подрост и подлесок. Угнетение существующего древостоя также отчасти происходит из-за механического повреждения стволов и корней, выступающих из вытоптанной и эродированной почвы. Однако главной причиной снижения биологической активности деревьев является уменьшение всасывающих окончаний на их корнях из-за уплотнения почвы. В более плотной и менее влагонасыщенной почве снижается также количество биогенных веществ, доступных растениям.

Природно-антропогенные процессы

Природно-антропогенными следствиями рекреационной нагрузки являются ослабление биологического круговорота и уменьшение биомассы на единицу площади, развитие поверхностного смыва, линейной эрозии и некоторых других процессов поверхностного движения вещества.

Количественные данные, характеризующие изменение древостоя, а следовательно и нарушение биологического круговорота в зависимости от нагрузки, получены на примере сосновых молодняков Ждановичского лесопарка вблизи г. Минска Л. Н. Рожковым и В. С. Романовым. Средняя высота насаждения I стадии дигрессии принята за 100 %. На последующих стадиях высота в среднем равна: на II стадии — 94 %, на III — 87, на IV — 82 и на V стадии — 75 % от средней высоты древостоя сосняка мшистого одинакового возраста. Усыхающие и усохшие деревья в исследуемых насаждениях составляют: на I—II стадиях дигрессии не более 9 %, возрастая на IV—V стадиях до 21 %. Велик удельный вес ослабленных и поврежденных деревьев (от 50 % на III до 70 % на V стадиях дигрессии).

Ослабленные рекреационным воздействием леса чувствительнее к воздействию вредителей, загрязнению воздуха и таким стихийным бедствиям, как ветровалы.

Процессы плоскостного смыва и ускоренная линейная эрозия, ведущая к быстрому росту оврагов, широко распространены в рекреационных лесах. Однако количественные данные, характеризующие эти природно-антропогенные процессы, автору не известны.

В аридных областях в настоящее время усиленно развивается моторизованная рекреация. Прогулочное движение мотоциклов и автомобилей по пустыням и полупустыням приводит к нарушению растительного покрова. После этого в таких местах развиваются ускоренная эрозия и дефляция.

Например, по данным Е. Хованца и соавторов, каньон Балингер (США, шт. Калифорния) в течение 8 лет используется

в рекреационных целях. В результате движения транспорта вне дорог ксерофитная растительность сильно изрежена и быстрыми темпами развивается эрозия. На наиболее посещаемых участках смыто в среднем около 0,6 т почвы с 1 м². Максимальная интенсивность смыва достигает 250 кг/м²·год. Средний темп смыва на территории, примыкающей к месту, отведенному для стоянок, составляет 19 т/га·год, что в 5 раз больше скорости естественной денудации.

Рекреационные нагрузки пока еще, по-видимому, играют гораздо меньшую роль в экзодинамике земной коры суши, чем воздействие сельского хозяйства. Однако быстрый рост городов и их населения вскоре приведет к тому, что рекреационные нагрузки будут расти и распространяться на все более значительные площади.

ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ И ИХ СЛЕДСТВИЯ

В составе 4,1 млрд. га лесных земель покрыто лесом около 3,7 млрд. га. Чистая продукция мировых лесов составляет в настоящее время $50 \cdot 10^9$ т сухого вещества, из которых 60 % произрастает в тропических лесах. Только часть этой продукции может быть использована человеком в виде древесины, так как другая часть прироста, представленная корнями, листвой, плодами, тонкими ветками и т. п., часто не утилизируется по экономическим и техническим соображениям. Поэтому годовой прирост древесины, доступной для использования, равняется, по различным оценкам, от 7 до 9,3 млрд. м³.

Антропогенные процессы

В 1975 г. в мире использовалось 2431 млн. м³ древесины, из которых 1249 млн. м³ шло в промышленную переработку и 1182 млн. м³ на топливо. Только 18,2 % мирового производства древесины приходилось на тропические страны. В развивающихся странах до 80 % древесины используется на топливо, а в развитых странах, наоборот, 80 % древесины — коммерческие.

В 1975 г. в СССР изготовлено 388 млн. м³ древесины, из которых 305 млн. м³ были промышленными, а 83 млн. м³ представлены топливной древесиной. Такого количества древесины не заготавливает ни одна другая страна.

Леса вместе с почвами, на которых они произрастают, образуют наиболее энергоемкую и поэтому очень стойкую к атмосферным воздействиям верхнюю защитную пленку земной коры.

До вмешательства человека лесная растительность испытывала различного рода нарушения, главными из которых были последствия от пожаров или массового воздействия вредителей.

В настоящее время человек своими действиями прямо и опосредствованно воздействует на лесную растительность. Негативные антропогенные воздействия в настоящее время резко преобладают над позитивными.

К негативным лесохозяйственным мероприятиям, которые по сути дела являются вынужденными, относится сведение леса для получения древесины. К позитивным принадлежат различные меры по уходу за лесом или по его восстановлению. Существует мнение, что биологическая продуктивность лесов может быть увеличена с помощью обычной практики их улучшения. При этом выход коммерческой древесины, как считает С. Спар, удвоился бы.

Улучшение состояния лесной растительности достигается различными мелиоративными мерами, к числу которых относятся и рубки ухода.

Общая цель рубок ухода — сокращение сроков выращивания желательных по составу насаждений, улучшение их качества, санитарного состояния и повышение продуктивности, устойчивости и защитных свойств.

В зависимости от возраста насаждений рубки ухода делят на следующие виды: осветление, прочистка, прореживание, проходные рубки.

Санитарные рубки представляют собой особое мероприятие, проводимое в целях оздоровления насаждений и борьбы с вредными насекомыми и грибковыми заболеваниями. На особенно сильно зараженных участках иногда проводят сплошную рубку.

Сплошные рубки являются в настоящее время главным приемом получения коммерческой древесины. Вследствие того что они наименее трудоемки, их применение дает возможность заготавливать свыше 90 % всей товарной древесины, получаемой в мире.

Сплошные рубки относятся к рубкам главного пользования. К этому виду рубок, проводимому в спелых насаждениях, относятся также постепенные и выборочные. Разница между названными тремя видами рубок главного пользования состоит в следующем: при сплошных рубках деревья на лесосеке вырубаются одновременно и сплошь за исключением подроста и семенников; при постепенных — древесиной вырубают сплошь, но не одновременно, а в несколько приемов, в зависимости от появления самосева; при выборочных — срубаются только отдельные деревья.

Сведение леса при сплошных рубках представляет собой специфический вид антропогенной денудации земной коры. При этом временно уничтожается наиболее существенная часть входящего в ее состав поверхностного буферного устройства, ослабляющего механическое разрушение поверхностных образований.

Сплошные рубки в горах оказывают особенно значительное воздействие на природную экзодинамику земной коры суши.

Показательными являются данные по советской части Карпат, собранные Н. М. Горшениным [8] на лесосеках, приуроченных к поясу смешанных буковых лесов (абс. отметки 600—1100 м). В этом районе как и на большинстве других горных территорий умеренного пояса лес произрастает на скелетных почвах. Содержание грубообломочного материала в них колеблется от 30 до 90 % от их массы.

Водопроницаемая способность скелетных почв выше интенсивности наиболее сильных ливней. Поэтому всюду, где они развиты, поверхностный смыв проявляется слабо и, по-видимому, в большинстве своем действует при снеготаянии, когда почва находится в мерзлом состоянии.

Сплошные рубки представляют собой очень сильное нарушение растительного, а отчасти и почвенного покровов. Как указывает Н. М. Горшенин, в 40-х годах и после лесозэксплуатация в изученном им районе велась преимущественно в бесснежный период, работы не прерывались в дождливую погоду, поскольку это облегчало проведение наземной трелевки самоспуском или на конной тяге. Скользящие стволы сносили лесную подстилку и наиболее рыхлую и плодородную верхнюю часть почвы, разрушали ее структуру и вызывали значительное уплотнение оставшейся части почвенного профиля.

Особенно сильное нарушение почвенного покрова вызывает применение обычной наземной транспортировки леса на участках трелевки на магистральных волоках и погрузочно-разгрузочных площадках.

Примером того, как меняются физические свойства почвы в местах перемещения леса, являются данные, полученные М. Ю. Халиловым и А. М. Алиевым в пределах Малого Кавказа на склонах крутизной 16° северной, северо-западной и северо-восточной экспозиций на высоте 870 м (Исмаиллинский лесхоз Азербайджанской ССР) (табл. 18).

Таблица 18

Объемная масса, общая пористость и водопроницаемость почв буковых лесов на одном из склонов Малого Кавказа

Состояние участка леса	Степень смытости	Генетические горизонты	Глубина, см	Плотность, кг/м ³	Объемная масса, кг/м ³	Общая пористость, %	Водопроницаемость, мм/мин
Не тронутый рубкой буковый лес	Несмытая	A	0—5	2170	900	58,5	92—100
		A	10—15	2220	1240	44,1	
На месте стаскивания деревьев	Слабосмытая	A	0—5	2230	1200	46,2	2,6—4,0
		A	10—15	2320	1330	42,7	
На магистральной трактовой дороге	Сильносмытая	BC	0—5	2180	1290	40,8	0,13—0,20
		BC	10—15	2220	1430	35,6	

Природно-антропогенные процессы

Антропогенное нарушение растительности, а отчасти и почвенного покрова на участках сплошных рубок приводит к возникновению интенсивного поверхностного смыва. В советской части Карпат снос почвы со сплошных вырубок колебался от 50 до 400 т/га·год при крутизне склонов от 14 до 35°. Местами потери почвы составляли 1000 т/га·год и более. В некоторых случаях там, где лес произрастал прямо на курумах, лишь прикрытых тонким торфорастительным слоем, после рубок последний был полностью удален и на поверхности обнажились голые камни. О том, какие потери органического вещества почвы имеют место в результате проявления антропогенных и природно-антропогенных процессов на участках сплошных рубок, свидетельствуют следующие данные (табл. 19).

Таблица 19

Содержание органического вещества в 0,5 м³ мелкозема (в килограммах сухой массы) на различно эродированных участках сплошных рубок в советской части Карпат [8]

Характеристика участка	Живой покров мха и травы	Лесная подстилка	Корни	Мелкозем	Всего сухой массы	Средние потери сухой массы	
						кг	%
Контроль в лесу	0,15	3,29	0,81	76,08	80,33	—	—
Слабоэродированный	3,57	—	—	72,07	75,45	4,88	6
Сильноэродированный	0,03	—	—	38,29	38,32	42,01	52
Очень сильноэродированный	—	—	—	0,33	0,33	80,00	99,6

При полном уничтожении почвенного покрова покрытые каменными развалами и курумами пространства восстанавливаются очень медленно. На это в естественных условиях требуются сотни лет. Если разрушение растительности и почвы не зашло так далеко, то природный режим экзодинамических процессов устанавливается на лесосеках уже через 3—10 лет, как свидетельствуют данные Ю. Н. Краснощекова по горным территориям бассейна Байкала. Однако по наблюдениям Д. Харриса на трех участках хр. Берегового (шт. Орегон, США) механический смыв с водосбора ручья, где лес вырубил полностью, был

в течение 7 лет (период наблюдений) выше, чем в год рубок. В то же время в бассейне ручья, где сплошная рубка была проведена на части площади, за этот же период смыв нормализовался.

Сплошные рубки на равнинах также значительно ухудшают состояние почвенно-растительного покрова. Места, занятые рубками, покрываются густой сетью дорог, вдоль которых развивается эрозия, наряду с ее проявлением на волоках и в других местах. Много обломочного материала поступает в реки при сплаве по ним бревен. Бревна скатывают в русла обычно с уступов террас и здесь на них налипают мелкозем. При транспортировке по воде мелкозем смывается с них, и твердый сток реки увеличивается. Кроме того, бревна служат поставщиками органического вещества в воду. Подсчитано, например, что в оз. Байкал при лесосплаве поступает 70 тыс. т органических соединений (в пересчете на углерод) в результате экстракции их из древесины и коры.

Сплав и буксировка древесины по рекам приводят к тому, что часть бревен теряется и попадает в захоронение на дно рек, что отрицательно сказывается на качестве воды. В настоящее время на дне рек, по которым производится молевой сплав древесины или некачественная транспортировка ее в плотках, накапливаются потерявшие плавучесть топляки. Особенно много их в заводях рек, где топляки захоронены среди донных осадков. Имеются и целиком сложенные из бревен донные образования.

Согласно А. Беленкову, потери древесины при лесосплаве происходят главным образом в результате ее утопа в запанях и на путях сплава (42 % потерь), разноса бревен по поймам неустроенных рек (18 %), аварии плотов (8 %), поломки древесины, «подныра» и других видов потерь (32 %).

С целью сокращения потерь древесины от утопа и разноса на сплавных реках СССР сейчас устанавливается все больше лесонаправляющих и лесоогораживающих сооружений, а также применяются прогрессивные способы сплава, обеспечивающие его безостановочное движение. Благодаря этому потери древесины в сплаве с 1,1 % в 1971 г. снизились до 0,85 % в 1978 г. Тем самым снижен объем работ по подъему топляка и сбору разнесенной древесины.

Для очистки засоренных рек производится подъем затонувшего леса и сбор разнесенной древесины. Ежегодно поднимается 1—1,3 млн. м³.

Лесохозяйственные мероприятия сказываются на работе всех звеньев бассейново-речных ПЭС. Однако наиболее существенным оказывается влияние сплошных рубок, в результате которых может происходить значительное, а иногда и полное уничтожение почвенного слоя.

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ И ИХ СЛЕДСТВИЯ

Управление водными ресурсами является необходимым условием производства в развитом обществе. Большие количества воды нужны городам, промышленным комплексам, орошаемым землям. Без управления стоком рек трудно создать противопаводковую защиту, использовать водный транспорт, осуществлять рекреационные мероприятия, связанные с водоемами.

В настоящее время деятельность человека ведет ко все большему истощению запасов воды на суше. Это выражается в следующем: 1) сокращении протяженности мелкой речной сети; 2) понижении уровня ряда озер; 3) превращении переувлажненных заболоченных земель в осушенные; 4) иссушении почв в областях антропогенного опустынивания; 5) понижении уровня подземных вод в районах их избыточного забора и в районах местонахождения глубоких карьеров. Этим явлениям противостоят мероприятия, с которыми связано повышение водного потенциала суши. К ним в первую очередь относятся создание водохранилищ и каналов, освоение пустынных земель и др. Однако в целом для суши характерен отрицательный водный баланс, выражающийся, по данным Р. К. Клиге, в виде следующих составляющих (в км³/год):

сокращение объема озер	—38
сокращение объема подземных вод	—108
таяние ледникового покрова	—429
создание водохранилищ	+70
пополнение Мирового океана	+543

Из этих цифр видно, что в глобальном масштабе человечество компенсирует сокращение объема озер созданием водохранилищ, но очень расточительно тратит подземные воды. Правда там, где создаются водохранилища и каналы запасы подземных вод увеличиваются. Однако этот прирост количества воды в земной коре пока не оценен.

Вмешиваясь в природную структуру распределения воды на суше, человек прямо или опосредствованно меняет экзодинамические процессы внутри бассейново-речных ПЭС. Масштабы антропогенного вмешательства определяются не только размахом водохозяйственных мероприятий, но и тем, к каким ПЭС и входящим в них ПЭК эти мероприятия приурочены, к какой части ПЭК приложено антропогенное воздействие. Например, воздействие водохранилища зависит от его местоположения в речной долине, от размеров долины и ограниченного плотиной бассейна, от орографической и геоструктурной приуроченности.

Водохозяйственными сооружениями, вызывающими значительные по масштабам изменения в земной коре, являются водопроводные системы, водонапорные скважины, различного рода водооткачивающие и стоковые устройства и т. п. Геологические

результаты их функционирования частично рассматриваются в разделах, посвященных экзодинамике сельскохозяйственных и урбано-промышленных территорий и мест добычи полезных ископаемых. Водораспределение на этих территориях и связанные с ним последствия являются органической составляющей сложного комплекса антропогенных процессов, имеющих место в таких районах. Иначе обстоит дело с достаточно крупными водохранилищами и каналами, роль которых в геодинамике земной коры должна быть рассмотрена особо.

Водохранилища

Общие сведения

Создание крупных водохранилищ в целом компенсирует изъятие с суши воды, связанное с сокращением объема озер. Однако далеко не всякое водохранилище служит для пополнения запасов воды на ней. Многие из них создаются для получения дешевой электроэнергии как раз там, где вода имеется в избытке, и в этом случае обводняются и без того избыточно увлажненные территории. Тем не менее на данном этапе экономического развития водохранилища имеют огромное хозяйственное значение.

Водохранилища классифицируются по различным критериям. По условиям аккумуляции воды выделяются: 1) водохранилища в долинах рек, перегороженных плотинами (в том числе и расположенные на временных водотоках); 2) озера-водохранилища, зарегулированные плотинами; 3) наливные водохранилища; 4) водохранилища в местах выхода подземных вод, в том числе в условиях карста; 5) водохранилища, созданные в эстуариях и прибрежных участках моря, отделенные от него дамбами [5].

Наибольшее распространение имеют водохранилища, созданные в речных долинах. Самое большое из них по площади — африканское водохранилище Вольта (8480 км²), а самое емкое — Братское водохранилище на Ангаре (169,3 км³).

По положению в рельефе водохранилища обычно делят на равнинные и горные. Однако существует и более дробное их расчленение на равнинные, предгорные и плоскогорные, горные и высокогорные. Водохранилища различают также по размерам (табл. 20).

Водохранилища классифицируются также по конфигурации в плане, по термическому режиму, по характеру регулирования стока, по показателю водообмена, по гидрохимическому и гидробиологическому режимам.

Водохранилища занимают около 589 тыс. км², причем из этой площади 236 тыс. км² принадлежит водохранилищам, представляющим собой озера в подпоре.

Классификация водохранилищ по размерам [5]

Категория водохранилищ	Полный объем, км ³	Площадь водного зеркала, км ²
Крупнейшие	Более 50	Более 5000
Очень крупные	50—10	5000—500
Крупные	10—1	500—100
Средние	1—0,1	100—20
Небольшие	0,1—0,01	20—2
Малые	Менее 0,01	Менее 2

Местоположение наиболее крупных водохранилищ показано на рис. 10, из которого видно, что больше всего их сосредоточено в США. Среди речных систем бассейн р. Енисей находится на первом месте по количеству воды, аккумулированной в водохранилищах. Уровни воды водохранилищ в течение года изменяются от долей до десятков метров, а в редких случаях и более чем на 100 м. Изменение гидрологического режима зарегулированной реки далеко не во всем оказывается благоприятным.

Водоохранилища — огромные испарители влаги. В аридных областях с их поверхности ежегодно испаряется слой воды до 2000 мм и более. На большей части территории СССР этот показатель равен 800—1000 мм.

А. Б. Авакян подразделяет функции водохранилищ на следующие виды: 1) «склад» воды, обеспечивающий: а) круглогодичное бесперебойное снабжение водой городов, промышленных предприятий, орошаемых и обводняемых массивов; б) улучшение и удешевление забора воды насосными станциями; 2) акватория разноцелевого назначения, используемая для рекреации, судоходства, рыбного хозяйства и др.; 3) источник и аккумулятор энергии, вырабатываемой ГЭС; 4) регулятор стока в многолетнем, сезонном, недельном и суточном разрезах в интересах различных отраслей хозяйства; 5) объект, изменяющий качества воды в лучшую (уменьшение мутности, цветности, запахов, содержания в воде сапрофитных бактерий и кишечной палочки) и худшую (эвтрофикация) стороны; 6) объект, влияющий на земельные ресурсы в худшую (затопление, подтопление, переработка берегов, образование островов, обезвоживание и осушодоливание пойменных угодий в нижнем бьефе и др.) и лучшую (увеличение возможности орошения и обводнения земель в нижних бьефах в районах, страдающих от наводнений и др.) стороны; 7) объект, вносящий некоторые другие положительные и отрицательные изменения в природу и хозяйство. К их числу относится влияние на климатические условия в прибрежной по-



Рис. 10. Схема размещения водохранилищ мира с полным объемом более 1 км³ [5]

лосе, на русловые процессы в нижнем бьефе, на сроки становления и вскрытия ледостава на реке ниже плотины и др.

Влияние крупного водохранилища или каскада водохранилищ на окружающую среду не ограничивается изложенным перечнем. Весьма существенно также и то, что крупное искусственное подпрудное озеро в период создания может провоцировать вызванные землетрясения даже в несейсмичных районах. В отдельных случаях вызванная человеком сейсмическая активность приводила к разрушениям жилищ и человеческим жертвам.

Безвозвратное использование воды из водохранилищ на различные нужды и большие потери ее за счет испарения приводят к значительному понижению уровня проточных и бессточных озер, в которые впадают зарегулированные реки.

В то же время быстрое заиливание водохранилищ угрожает тем, что некоторые из них в будущем могут выйти из строя. Как указывает Г. П. Калинин, если в обозримое время не будут найдены эффективные меры борьбы с заилением, то на месте каскадов водохранилищ будут существовать каскады заиленных водоемов, лишенных водорегулирующей способности. Водохранилища превратятся в илохранилища.

Наконец, создание водохранилищ приводит к разрушению и отчасти погребению почвенно-растительного покрова, лишает местообитания и тем самым уничтожает животный мир зоны затопления. Частично такие же процессы происходят и в зоне подтопления. Таким образом, водохранилища вызывают редукцию и без того ослабленной биосферы Земли.

Но особенно серьезным возражением против широкого распространения крупных водохранилищ является безвозвратная потеря земель. Ограниченность земельных ресурсов в сумме с ростом населения обуславливают постоянный рост цены на землю. Особенно высока и продолжает расти стоимость продуктивных земель. Следует указать, что в аналогичном положении находится и стоимость энергии, в частности электроэнергии, производимой ГЭС. Однако для выработки дополнительных количеств энергии в настоящее время существует много альтернатив (энергия из отходов, из водорослей, атомная, геотермальная, ветровая, солнечная, приливов, морских волн и течений), разработка которых при таких же капиталовложениях, как в гидроэнергетику, несомненно дала бы положительный эффект, что видно на примере уже действующих АЭС. В то же время земельные ресурсы почти не восполнимы. Поэтому прав С. С. Кожанов, настаивающий на том, что дальнейшее расширение площади равнинных ГЭС в СССР недопустимо. При этом С. С. Кожанов ссылается на высказывания Л. И. Брежнева на III Всесоюзном съезде колхозников. На нем Л. И. Брежнев говорил о том, что нельзя считать наши земельные ресурсы безграничными и что любую порчу земли следует рассматривать как антиобщественный поступок.

С. С. Кожанов резонно указывает на то, что многие водохранилища комплексного использования в настоящее время подчинены интересам энергетики, работают в пиковом режиме и тем самым наносят народному хозяйству большой экологический ущерб. Этот ущерб связан с проявлением антропогенных и природно-антропогенных процессов, что является лишним доказательством необходимости всестороннего познания последних с целью выработки мер по управлению и контролю над такими процессами.

Антропогенные процессы

Процессы-мероприятия, ведущие к изменению строения земной коры и природной экзодинамики в зоне создания водохранилища,— это строительство плотины и связанных с ней объектов (шлюзы, проходы для рыбы, пропуска леса и др.), а также инженерные защитные работы. Опосредствованно связаны с подготовкой зоны затопления перенос из нее населенных пунктов на новые места, прокладка новых коммуникаций, сельскохозяйственное использование до этого неосвоенных земель.

При строительстве водохранилищ в плотины укладываются огромные количества искусственных грунтов. По подсчетам М. И. Хазанова [40], до 1964 г. суммарный объем плотин составлял 16 км³. Только одна высотная (234 м) плотина им. Гувера в Большом каньоне р. Колорадо содержит столько бетона, сколько нужно, чтобы построить двустороннюю автостраду из Чикаго до Сан-Франциско.

В комплекс инженерных защитных работ входят: обвалование территорий, укрепление берегов и откосов существующих земляных сооружений, устройство волноломных и волноотбойных сооружений, подсыпка (намыв) берегов и защитных пляжей, дренаж обвалованных и подтопляемых территорий, планировка дна и берегов водохранилища, гидроизоляционные и другие работы по локальной защите и приспособлению объектов к новым гидрогеологическим условиям. Чтобы предотвратить загрязнение вод будущего искусственного озера, на его дне сводится древесная растительность и массивы торфяников по возможности засыпаются щебнем или гравием для предотвращения всплывания этих органических образований.

Инженерные мероприятия проводятся также для защиты городов, поселков и отдельно расположенных фабрик и заводов. В СССР благодаря обваловыванию и другим способам защиты от воздействия водохранилищ предохранены более 50 городов и поселков городского типа, в том числе такие крупные города, как Ульяновск, Саратов, Киев, Краснодар, Казань и Черкассы.

Защищаются также и участки ценных сельскохозяйственных земель. Имеются водохранилища, полностью окаймляемые антропогенными насыпями [5].

В европейских странах часто осуществляется обваловывание и защита пойменных земель от низких и иногда средних паводков. При относительно высоких подъемах воды земли затапливаются, что способствует их обводнению и удобрению илом. Применяются также системы двойных дамб. Ближняя к водохранилищу предохраняет луга и леса от низких и иногда средних паводков, а более высокая система дамб рассчитана на защиту от высоких паводков возделываемых земель, поселков и коммуникаций.

Широко используется крепление берегов там, где проходят железные или шоссейные дороги.

Инженерная защита осуществляется также в нижних бьефах некоторых гидроузлов в тех местах, где конструкциям, находящимся в сфере действия речной эрозии, угрожало повреждение от активизации последней. Так, в нижних бьефах Горьковского, Рыбинского, Угличского, Киевского, Кременчугского и Камского гидроузлов на отдельных участках укреплены берега, усилены коммунальные сооружения (водозаборы, выпуски канализации, опоры мостов, причалы и др.), осуществлена подсыпка территории с укреплением откосов в городах Балахане, Правдинске, Рыбинске и др. [5].

К числу антропогенных процессов-мероприятий можно отнести и искусственное осаждение взвесей и очистку воды в водохранилищах с помощью химических веществ. Пока таким приемом пользуются лишь на небольших водохранилищах. Например, в США на водохранилище Лейк Нидвуд, которому угрожало полное заиление через 50 лет, для ускорения выпадения взвешенного материала на дно вводились безвредные химические вещества. В верхней части водохранилища было расчищено и углублено место, ставшее искусственной ловушкой наносов. При достижении определенного уровня последние извлекались землечерпательными устройствами со дна. В дальнейшем описанный способ разгрузки водохранилищ может найти более широкое применение.

Антропогенными процессами-следствиями можно считать изменения земной коры в зоне водохранилища, которые являются технически контролируемыми.

К таким процессам принадлежит *выработка узких вытянутых ложбин на дне водохранилищ* при попытках промывки последних от донных осадков. Для этого открывали огромные отверстия в теле плотины, на дне водохранилища возникали течения, однако ожидаемого площадного смыва осадков не происходило, а формировались упомянутые ложбины [49].

При значительных уклонах дна водохранилища (более 0,2 м/км) потоки с большим количеством наносов могут про-

ходить через отверстия в плотине. В обычных условиях количество изъятых материалов бывает столь невелико, что усилия по промывке не оправдываются. Однако в Алжире, где цена воды очень высока, в голове водохранилищ иногда устраивают дополнительную плотину, задерживающую наносы. Периодически в этой плотине открывают ворота, и наносы транзитом проносятся с паводковой волной через главную часть водохранилища в нижний бьеф.

При попусках воды из водохранилища в нижний бьеф в нем самом может значительно падать уровень, а в реке ниже плотины могут устанавливаться повышенные расходы. Преобразования, идущие в зоне воздействия водохранилища в основном под влиянием колебания уровня воды, также можно рассматривать как антропогенные. Прежде всего это будет перемещение различного плавучего материала (рассеянных бревен, древесного мусора и др.). На некоторых крупных реках, например на Енисее, попуски воды могли бы служить для смыва рассеянного по берегам товарного леса и сбора его для дальнейшего хозяйственного использования.

Всплывание торфяников является еще одним процессом указанного типа. В течение 2—5 лет после затопления площадей, на которых распространены эти органические образования, наблюдается всплывание торфяных масс. Их отрыв ото дна и подъем на поверхность происходят из-за малой плотности торфа и внутреннего давления газов, образующихся в процессе гумификации мертвой торфяно-растительной массы. Показателями плавучести, как указывают Е. Ронка и Р. Уусинока, являются следующие свойства торфа: плотность во влажном состоянии 88 %, пористость > 93 %, степень гумификации менее H_5 и среднее содержание газов > 43 л/м³. При всплывании торфяной материал разносится по акватории и загрязняет воду детритом, гуминовыми кислотами и соединениями азота и фосфора. В 1946 г. следовавший по Рыбинскому водохранилищу пароход «Рульков» вместе с составом барж был приподнят всплывшим торфяным массивом. Явление всплывания торфяников широко наблюдается на водохранилищах СССР, Канады, Швеции и Финляндии.

Прогибание дна и окаймляющей зоны под нагрузкой плотины и водной массы, по-видимому, может иметь место в местах создания всех крупнейших водохранилищ. Как указывает А. А. Никонов [26], при возведении плотины длиной 3,7 км и высотой до 126 м Братского водохранилища под действием ее веса произошла осадка диабазов и песчаников основания на 8 мм еще до перекрытия Ангары. Затем, как и на Красноярском гидроузле, осадка резко увеличилась. Она достигла 63,6 мм при напорном уровне Братского моря около 70 м. Показательно, что с увеличением столба воды осадка увеличивалась от берегов к прежнему руслу, а воронка оседания распространилась на

2—3 км в стороны от водохранилища, достигнув 9—10 км в поперечнике.

Строительство плотины им. Гувера в нижней части Большого каньона р. Колорадо закончилось созданием водохранилища (оз. Мид) глубиной до 150 м и общей массой воды около 37 млрд. т. Оз. Мид приурочено к окраине платформенной глыбы плато Колорадо. В приподнятых блоках здесь обнажаются сильно перемятые и метаморфизованные гнейсы и сланцы нижнего протерозоя, прорванные гранитами и пегматитами. Эти образования выходят в основании стенок Большого каньона. Выше залегают неметаморфизованные верхнепротерозойские аргиллиты и песчаники, отделенные угловым несогласием от почти горизонтально залегающей толщи карбонатно-терригенного состава. Суммарная мощность последней достигает 300 м, а возрастной диапазон охватывает палеозойскую и мезозойскую эры. Геологический разрез плато Колорадо венчают кайнозойские дочетвертичные породы, среди которых значительная роль принадлежит вулканогенным образованиям и интрузивным телам. Четвертичные отложения распространены в виде маломощного чехла. Большую роль в структуре плато играют разломы и флексуры.

Относительно подробное описание геологического положения оз. Мид дано здесь из-за того, что для района этого водохранилища собрана наиболее полная информация о вызванных антропогенных и природно-антропогенных тектонических движениях, которые несомненно влияли и на ход экзодинамических процессов.

В 1935 г. в самом начале заполнения водохранилища Мид была осуществлена высокоточная нивелировка по нескольким линиям, часть из которых пересекала его чашу. В 1940—1941 гг. нивелирование было повторено по линиям общей длиной около 1100 км. Возможное прогибание коры под нагрузкой водной массы составило максимально 18 см при субконцентрическом протяжении изолиний вокруг контура водохранилища. Величина прогибаний в течение периода наполнения водохранилища до 80 % объема достигала 12 см.

После наполнения водохранилища прогибание земной коры либо прекратилось, либо стало менее интенсивным. Согласно второй точке зрения оно достигло 20 см к 1963 г. При этом скорость прогибания упала на порядок — от 20 до 2,3 мм/год.

На оз. Мид впервые была установлена возбужденная сейсмичность под воздействием создания крупного водохранилища (около 6 тыс. толчков за 1937—1944 гг.). По расчетам Д. С. Кардера, высвобожденная при землетрясениях в районе оз. Мид энергия может считаться эквивалентной энергии прогибания земной коры под нагрузкой водохранилища.

На основании сведений о вызванных движениях земной коры, имеющихся также для ряда других районов с крупными водо-

хранилищами, А. А. Никонов сделал общие выводы относительно влияния нагрузки крупных водохранилищ на земную кору. Такие факты, как возникновение чаши прогибания вслед за появлением водохранилищ и совпадение в общих чертах участков максимального прогибания с участками наибольших глубин водохранилищ, позволяют считать, по его мнению, что нагрузка крупных водохранилищ, как и городов, — причина локальной прогибания земной коры. Под дополнительной нагрузкой в 2—10 кг/см² прогибание верхних частей земной коры превышает 10 см. Скорости прогибания (порядка 1—2 см/год) при резко приложенных дополнительных нагрузках очень велики. На платформах соизмеримые по скорости движения могут быть связаны еще и с изменениями нагрузки при материковом оледенении и дегляциации. Применительно к областям с повышенным фоном напряжений важен вывод о возможности проявления движений со скоростью порядка 1 см/год и возникновения землетрясений (с максимальной магнитудой 5—6) на платформах при изменении приложенного на поверхности давления порядка первых килограмм на квадратный сантиметр.

Прогибание земной коры под нагрузкой крупных антропогенных объектов можно рассматривать как крупномасштабный антропогенный процесс-следствие.

Природно-антропогенные процессы

Собранная в водохранилище масса воды лишь отчасти находится под контролем человека. Динамика водохранилища резко несогласуется с нормальным функционированием вмещающих его ПЭК и ПЭС, поэтому в сфере влияния водоема меняются старые и создаются новые потоки вещества.

Для различных зон, которые наиболее тесно связаны с водохранилищем, свойствен свой комплекс природно-антропогенных процессов. Такими зонами являются: 1) участок влияния подпора, 2) чаща водохранилища, 3) подтапливаемое окаймление, 4) нижний бьеф*.

Участок влияния подпора

После создания водохранилища в примыкающем подпруженном участке русла реки резко усиливается аккумуляция. Последняя на равнинных реках регрессивно распространяется на значительное расстояние вверх по течению.

Начало аккумуляции, как указывает Н. И. Маккавеев, приурочено к тому времени, когда в зоне выклинивания подпора

* Под нижним бьефом понимается участок реки ниже гидроузла, в пределах которого сказываются его водорегулирующие функции. На крупнейших реках влияние больших плотин ощущается на расстоянии во многие сотни и даже свыше тысячи километров.

осядет столько наносов, что в верхней части водохранилища сопротивление движению воды увеличится. Гидравлический напор, необходимый для преодоления добавочных сопротивлений, получается за счет кинетической энергии потока на вышележащем участке реки, где по этой причине скорость течения заметно убывает. Здесь начинается аккумуляция наносов, которая вызывает уменьшение скорости течения на соседнем участке выше по реке. Эксперименты показали, что объем отложенный в зоне регрессивной аккумуляции лишь немного уступает объему донных осадков в чаше водохранилища.

Согласно Р. Ф. Чалову [41], проанализировавшему данные о влиянии водохранилищ на русловой процесс в долинах рек Оби, Дона, Днепра, Волги, Камы и Енисея, регрессивная аккумуляция очень резко выражена на всех реках с высоким твердым стоком. Быстрее всего осадконакопление осуществляется в зоне переменного подпора, достигая здесь 3—5 см/год. Ниже по течению интенсивность наращивания отметок дна падает из-за уменьшения объема твердого стока реки при наступлении межени. Накопление аллювия на границе максимального распространения подпора приводит к повышению уровня воды в реке, а это в свою очередь вызывает распространение аккумуляции вверх по течению. Наряду с осадконакоплением в зоне переменного подпора в определенных условиях происходит эрозия.

Показательные данные по динамике эрозионно-аккумулятивных процессов в этой зоне приводят Н. И. Маккавеев и соавторы по Новосибирскому водохранилищу. Уровни воды в нем сильно меняются в течение года. Значительно колеблются и расходы воды в реке. Вследствие этого граница выклинивания подпора перемещается вниз и вверх по реке на значительные расстояния. В отдельных случаях в моменты сработки водохранилища в условиях подъема и пика половодья в нижней части зоны переменного подпора водная поверхность приобретает характер кривой спада с увеличением уклонов и скоростей вниз по течению в отдельные годы в 2—4 раза. На этом участке дно реки размывается, а снижение его отметок достигает 1,5 первоначальной глубины. Протяженность зоны весеннего спада выше Новосибирского водохранилища достигает 40—60 км, а длина собственно зоны переменного подпора — 80 % длины водохранилища.

В зоне переменного подпора аккумулируется около 30 % общего количества наносов Оби. Дно реки повысилось, призма природно-антропогенных отложений распространилась на 90 км выше границы максимального подпора. В общей сложности в зоне регрессивной аккумуляции накапливается 28 % годового твердого стока реки, а сама зона продвигается вверх по течению на 6 км в год. В районе нижней границы зоны регрессивной аккумуляции седиментация идет со скоростью 5—7 см/год

и соизмерима с темпами заиления чаши водохранилища. Из-за повышения дна Оби в зоне регрессивной аккумуляции увеличилась и продолжает расти затопляемость поймы и одновременно усиливается раздробленность русла на рукава и оживление пойменных рукавов как следствие эрозионной деятельности полых вод на пойме [41].

Повышение уровня воды в реке в зоне регрессивной аккумуляции сопровождается подтоплением низких частей дна долины. А это в определенных условиях активизирует такие процессы, как карст, суффозия, оползание и т. п.

Чаша водохранилища

Главную роль в комплексе природно-антропогенных процессов, действующих в водохранилище, играет его заиление. Седиментация связана с поставкой на дно аллохтонного и автохтонного материала. Источниками первого в основном являются: 1) минеральный, главным образом твердый сток рек и временных потоков; 2) разрушение берегов и мелководий; 3) эоловый привнос; 4) антропогенные сбросы. Автохтонный материал вносится за счет биогенных процессов.

Улавливание речных наносов. Количество поступающих в водохранилище речных наносов зависит от природных условий и особенностей использования земли речного бассейна. Известные коррективы в это вносит степень интенсивности регрессивной аккумуляции в речных долинах, привязанных к водохранилищу. По-видимому, для горных водохранилищ этот фактор несуществен. В то же время на равнинах и особенно там, где они расчленены широкими долинами с пологими продольными профилями, в результате регрессивной аккумуляции перехватывается значительная доля твердого и даже некоторая часть растворенного материала, несомого реками в подпруженных водоемы.

Однако не весь обломочный материал, поступающий в водохранилище, оседает. Его количество, уходящее в нижний бьеф, бывает довольно большим, когда оно сравнивается, как это принято, с поступающим речным твердым стоком. В водохранилищах США, как указывает Г. Глимф, оседает от 25 до 75 % попадающих в них наносов. Однако, согласно Ф. Денди и Г. Болтону, в большинстве случаев упомянутые водохранилища являются ловушками 85 % поступающего в них твердого стока рек. Новосибирское водохранилище удерживает 97 % вносимых речных наносов.

Разрушение и переработка берегов. Появление значительной, а иногда и очень большой массы воды там, где до этого функционировал более или менее сбалансированный ПЭК, резко нарушает, подавляет и меняет действовавшие перед

этим экзодинамические процессы. Одним из наиболее активных становится процесс переработки берегов созданного водоема. Ими оказываются поверхности или уступы террас, аккумулятивные шлейфы подножия, коренные склоны, а иногда и искусственные сооружения — дамбы и др. Факторами, способствующими разрушению берегов, являются: 1) преобладание рыхлых пород в строении берегов; 2) крутосклонность и приглубость берегов; 3) развитие оползней и других процессов быстрого разрушения склонов; 4) отсутствие или подавленность водной и наземной растительности; 5) ветровое волнение, интенсивность которого зависит от орографии (горные водохранилища лучше защищены от ветров, чем равнинные), продолжительности ледостава и ряда других особенностей рельефа и климата; 6) удаление продуктов абразии и другого материала вдольбереговыми течениями; 7) перемещения береговой линии в течение года, которые составляют у некоторых водохранилищ по вертикали до 170 м и по горизонтали до 15 км.

У больших равнинных водохранилищ С. Л. Вендровым выделено пять гидрологических зон со своей спецификой гидродинамических условий и формирования берега: 1) приплотинная зона, как правило, наиболее широкая и глубокая и поэтому с наибольшим гидродинамическим воздействием на берег. Разрушение берега при прочих равных условиях идет здесь быстрее всего, а наносы аккумулируются только на глубине за пределами зоны сработки; 2) средняя зона, которая при НПУ по интенсивности воздействия на берег мало чем отличается от приплотинной. Однако при сработке уровня водохранилища здесь становится мелководным и волновая переработка значительно ослабевает; 3) верхняя зона, которая при НПУ мелководна, вследствие чего волновая переработка берега малоинтенсивна. Здесь откладывается преобладающая часть приносимых рекой наносов и быстро формируется прибрежная отмель; 4) зона выклинивания подпора, которая в зависимости от высоты уровня воды представляет собой дельту или русло реки. Формирование берега здесь осуществляется главным образом за счет эрозионно-аккумулятивных процессов; 5) зона небольших заливов, в которых идет относительно быстрая аккумуляция материала, поставляемого склоновыми процессами. Последние играют главную роль в формировании берега.

В результате воздействия местных рельефообразующих процессов абразионные и аккумулятивные берега водохранилищ приобретают дополнительную характеристику по типу моделировки. Так, среди абразионных выделяются обвальные, осыпные, эрозионные, оползневые, пльвунные, солифлюкционные, карстовые, торфяные и другие разновидности берегов. Среди аккумулятивных берегов — эолово-дюнные, дельтовые, пересыпные, илово-соляные, сплавинно-заторфованные, ракушечные, камышовые или тростниковые и др. [5].

В развитии берегов крупных водохранилищ В. М. Широков выделяет два основных периода, каждый из которых состоит из двух, постепенно сменяющих друг друга стадий. Первый период — становление берегов. Во время него преобладает абразия. Второй период — это время их стабилизации, когда определяющую роль играют аккумулятивные процессы.

Первая стадия периода становления берегов охватывает время от начала заполнения до достижения НПУ в искусственном водоеме. В среднем она длится 3—4 года и характеризуется абразионной обработкой склонов, переходящих по мере подъема уровня воды в субаквальные состояния. Наличие подводных абразионных уступов затрудняет возникновение прибрежной отмели и создает предпосылки для последующей абразии.

Во вторую стадию разрушение берегов происходит наиболее активно, вследствие чего формируются главные элементы берегового рельефа. Снижение активности абразии знаменует переход ко второму периоду эволюции береговой зоны.

Период стабилизации растягивается на многие десятки, а иногда и сотни лет. Его первой стадии свойственна значительная роль прибрежной аккумуляции наряду со все еще активной абразией. При этом интенсифицируются вдольбереговые потоки наносов, заметно возрастает значение неволновых факторов воздействия на берег, отшнуровываются заливы и спрямляются берега.

Во вторую стадию вследствие усиления аккумулятивных процессов идет сокращение площади водохранилища.

В зависимости от сочетания факторов, определяющих береговую динамику, скорость отступления или роста берегов на разных водохранилищах, характер моделировки и особенности их строения оказываются неодинаковыми. Учитывая это, Д. П. Финаров разработал классификацию водохранилищ СССР, основывающуюся на особенностях их взаимодействия с береговой полосой. Им, в частности, выделены зонально-провинциальные подгруппы водохранилищ. Наиболее характерными из них являются:

1. Водохранилища провинции лесной зоны Русской равнины с небольшими колебаниями уровня (Горьковское, Камское и др.).

2. Водохранилища провинции лесостепной зоны Русской равнины со значительными колебаниями уровня (Кременчугское и др.).

3. Водохранилища провинции степной зоны Русской равнины с небольшими колебаниями уровня (Днепровское, Волгоградское и др.).

4. Водохранилища провинции степной зоны Русской равнины со значительными колебаниями уровня (Каховское, Цимлянское и др.).

5. Водохранилища провинции лесной зоны Средней Сибири со значительными колебаниями уровня (Братское, Вилюйское и др.).

6. Долинные водохранилища провинции пустынной зоны Средней Азии (Чардарьинское и др.).

Представляют интерес данные об особенностях формирования берегов на водохранилищах различных зонально-провинциальных подгрупп.

Наиболее крупные долинные водохранилища первой подгруппы — Горьковское, Камское и Киевское. Они созданы в слабо врезанных долинах, выработанных в ледниковых и водно-ледниковых отложениях. Выработка подводных и надводных абразионных форм на берегах, сложенных моренной, происходит с образованием естественной отмости из скапливающихся валунов у уреза воды. Эти скопления приводят к образованию своеобразного крутого пляжа и на значительных участках образуют поверхностный слой отмели. Вследствие этого переработка берегов резко ослабевает.

Как указывает далее Д. П. Финаров, для водохранилищ этой подгруппы характерны большие площади мелководий и широкое распространение низких отмелых берегов в связи с небольшим врезом долин. В частности, на Киевском водохранилище мелководья (до 2 м) составляют 34 % площади. Поэтому на больших пространствах оно окаймлено отмелыми, зарастающими нейтральными берегами, занимающими 47 % их общей длины. У Горьковского водохранилища этот показатель еще выше и составляет 58 %. На более глубоком Камском водохранилище широко распространены абразионно-карстовые берега.

Весьма динамична переработка берегов на водохранилищах третьей зонально-провинциальной подгруппы. Они располагаются в сравнительно глубоко врезанных и наиболее древних по возрасту долинах рек внеледниковой зоны Русской равнины. Берега сложены преимущественно лёссовидными рыхлыми породами, которые легко разрушаются не только ветровыми волнами, но и вследствие размокания, растворения и выветривания.

При абразии лёссовых берегов большая часть обрушенного материала выносится во взвешенном состоянии и не участвует в формировании отмели. Вследствие этого отмель длительное время сохраняет абразионный характер, а затухание переработки берегов здесь не наступает длительный срок. Интенсивная овражная эрозия, стимулируемая абразией и наличием лёссовых отложений, способствует быстрому отступанию берегов.

Большая продолжительность безледного периода (на 1—1,5 мес) в степной зоне, по сравнению с лесной,— более интенсивные ветры, приглубость берегов и наличие чрезвычайно податливых к разрушению водой лёссовых пород — все это обуславливает очень значительную величину переформирования берегов, которая достигает 180—220 м за 10 лет. Максимальные

величины переработки берегов в лесной зоне в 4—5 раз меньше и составляют за это же время 40—60 м.

Водохранилища пятой зонально-провинциальной подгруппы (Братское, Усть-Илимское, Вилюйское и др.) созданы в древних, глубоко врезанных долинах и находятся в условиях сурового климата, обуславливающего относительную непродолжительность безморозного периода (100—150 дней). Поэтому суммарная энергия ветрового волнения здесь оказывается небольшой. Сравнение ее показателей для Каховского и Усть-Илимского водохранилищ показывает, что энергия ветрового волнения в пределах первого почти втрое больше.

Разрушение берегов в условиях сурового климата стимулируется мощным морозным выветриванием. Интенсивная дезинтеграция пород происходит не только на береговых склонах, но и на отмели. В зимнее время при низких уровнях увлажненные отложения отмели разрушаются, а весной и летом при подъеме уровня воды породы разуплотненного слоя быстро размываются. Наблюдения на Братском водохранилище показывают, что мощность такого «срезаемого» слоя здесь достигает 1,3 м, что приводит к увеличению глубин на отмели и последующему усилению абразии берегов.

В областях развития четвертичных многолетнемерзлых пород переформирование чаши и берегов водохранилища первоначально должно сопровождаться ощутимым увеличением их объема. Это связано со следующими изменениями: 1) деградацией мерзлоты в пределах чаши водоема; 2) уменьшением объема пород, содержащих подземный лед; 3) всплыванием торфяников и последующим значительным уничтожением растительного детрита. Я. А. Кролик и Т. С. Оникиенко подсчитали, что увеличение объема Хантайского водохранилища за счет указанных процессов составило в настоящее время 2,96—3,54 км³.

Специфические процессы расчленения береговых склонов происходят на водохранилищах, чаша которых располагается в кристаллических многолетнемерзлых породах.

В. И. Спесивцевым установлено, что трапповые породы (долериты, диабазы) в долине р. Вилюй до глубины 30—40 м включают большое количество льда либо льдистых отложений, заполняющих древние оползневые рвы и трещины. В результате образования Вилюйского водохранилища под воздействием теплящего влияния воды лед и льдистые отложения во рвах и трещинах протаивают. На береговых склонах возникают и продолжают формироваться огромные каньонообразные провалы, ямы, рвы, воронки, пещеры, трещины и другие формы рельефа. Глубина их 30—40 м, ширина от нескольких сантиметров до 5—8 м при длине 80—100 м и более.

Водохранилища шестой зонально-провинциальной подгруппы находятся в долинах, выработанных преимущественно в малоустойчивых породах (аллювиальные и эоловые пески, каменные

лессы и др.). В переформировании берегов существенную роль играют процессы растворения и размокания пород. Существенное участие в этом принимают эоловые процессы. Объемы разрушения берегов в результате действия ветра соизмеримы, а иногда и превышают волновые размывы. Действие ветра проявляется в непосредственном выдувании песков, слагающих берег, а также развевании песков с обнажившихся отмелей в периоды сработки водохранилища. Дефляция отложений отмели приводит к увеличению глубин, а отсюда и к увеличению размывающей энергии ветровых волн во время последующего повышения уровня воды в водохранилище. Высокая интенсивность процессов взаимодействия водной массы с берегами обусловлена очень большой продолжительностью безморозного периода (от 250 дней до года).

Приведенные сведения показывают, что масштабы переработки берегов на крупных равнинных водохранилищах значительно варьируют. Однако, как правило, в период становления берегов в составе осадочного материала, заиляющего водохранилище, продукты абразии либо преобладают над его поступлением из других источников, либо незначительно уступают по количеству твердому стоку подпруженных рек. Так, согласно Л. А. Благовидовой и соавторам, в течение 15 лет существования Новосибирского водохранилища в результате переработки берегов, размыва дна и островов ежегодно аккумулировалось 7,0 млн. м³ осадков, а за счет твердого стока рек и овражной эрозии — 7,1 млн. м³. В Ивановском, Угличском и Рыбинском водохранилищах в течение последних 40 лет сток наносов составлял от 17,5 до 38,9 %, а продукты размыва дна и берегов — от 58,1 до 66,1 % от общего количества поступившего в них материала [5].

К сожалению, автору не удалось найти данных о вкладе процессов разрушения берегов в осадконакопление горных водохранилищ. Имеются высказывания, что этот вклад незначителен. Однако данный вопрос еще мало изучен.

Эоловый привнос. Роль ветра в поставке вещества в водохранилища варьирует в зависимости от географических условий. Велика она в аридных районах. Однако точными данными по этому поводу автор книги не располагает.

Антропогенные сбросы. И эта статья прихода вещества в искусственные водоемы может быть ощутимой среди составляющих седиментации. Однако и по ней у автора нет точных оценок.

Образование автохтонного органического вещества. Этот процесс играет важную роль в формировании донных осадков водохранилища. Вместе с тем от содержания органического вещества и продуцирующих его организмов зависит качество воды, а также функционирование системы вода \rightleftharpoons донные осадки.

Большинству водохранилищ свойственно бурное развитие биогенных процессов, особенно в первые 3—4 года существования. Причиной этого является аномально высокое содержание биогенных веществ в воде, связанное с вспышкой природно-антропогенных процессов, которая происходит при его создании и в течение некоторого последующего срока. Аномально высокая продуктивность водохранилища, основывающаяся на экстремально большой продукции фитопланктона, рассматривается как его эвтрофикация. Иногда вместо этого термина используется другой — «цветение воды».

Согласно В. В. Куприянову, эвтрофикация — это медленный необратимый процесс повышения биологической продуктивности озер, водохранилищ и участков рек с замедленным водообменом в результате накопления биогенных веществ. На первой стадии эвтрофикация выглядит как положительный процесс, так как в только что образованном водохранилище быстро повышается продуктивность всех населяющих водоем сообществ, в том числе рыб. Правда, рост продуктивности рыб идет в основном за счет малоценных видов. Затем по мере развития эвтрофикации качество промысловых рыб постепенно снижается. В конечной фазе развиваются заморные явления и наступает омертвление водоема. Омертвление происходит из-за того, что количество отмирающего фитопланктона становится очень большим и на окисление мертвого органического вещества расходуется почти весь растворенный кислород воды.

Эвтрофикацию водохранилищ, как указывает Л. А. Сиренко, обуславливают: 1) потоки биогенных веществ из различных источников, в сумме создающие их аномально высокое содержание в водоеме, и 2) гидродинамические условия и параметры водоема.

Основными поставщиками биогенов являются: 1) сельскохозяйственные угодья (пашни и пастбища), 2) животноводческие фермы, 3) урбанизированные территории и 4) автостреды. Вынос соединений азота и фосфора из этих источников осуществляется с подземными и поверхностными водами, с ветром, а также путем прямого антропогенного сброса. Большую роль в поставке биогенов в первые годы существования водохранилища играет абразия. Биогенные вещества вносятся в значительных количествах и за счет их ремобилизации из затопленных почв и растительности, а по мере накопления различных донных осадков частично поступают в воду и из них. Источником повышенного количества биогенов являются воды главной реки, втекающей в водохранилище. Соединения азота, кроме того, поступают в водоем из воздуха с грозowymi осадками в результате азотрофиксации. Связанный при грозах азот выпадает в количестве от 2 до 10 кг/га в год.

Благоприятная ситуация для эвтрофикации создается самим наличием водоема с медленным водообменом и гораздо большей

площадь, чем у существовавшей на его месте гидросети. Последнее обстоятельство обуславливает увеличение улавливания потока биогенов из воздуха, а вследствие замедленного водообмена снижается поглощение кислорода на единицу объема воды, происходит стратификация водной массы и образование обденных этим газом придонных слоев.

Многие водохранилища, особенно равнинные, относятся к числу мезотрофных и высокоэвтрофных водоемов. Известно, что первичная продукция малопродуктивных водоемов за год составляет до 1200, а высокоэвтрофных от 10 000 до 14 000 кДж/м². Исходя из этих цифр, Кременчугское водохранилище с продукцией в 1972 г., равной 13 996 кДж/м², отнесено Л. А. Сиренко к высокоэвтрофным, а Горьковское с продукцией 6116 кДж/м² — к мезоэвтрофным. Эвтрофикация наблюдается у водохранилищ в самых различных условиях, особенно в первые годы их создания. Только на 1/5 из существующих водохранилищ эвтрофикация отсутствовала.

Процесс эвтрофикации пагубно сказывается на качестве воды. В прижизненных выделениях водорослей обнаруживаются органические кислоты, аминокислоты, пептиды, полисахариды, эфирные масла, карбонильные соединения, эндотоксин и другие биологически активные вещества. При гибели и распаде водорослей выделяются фенолы, меркаптаны, алифатические кислоты, наличие которых делает воду не пригодной для питьевых целей, а также для существования гидробионтов [5].

Осуществление биогенных процессов и в первую очередь развитие фитопланктона является важным, а во многих водохранилищах важнейшим источником органического вещества, захороняющегося в осадках. Г. П. Доложенко провел сравнение состава и содержания органического вещества донных осадков различных водохранилищ европейской части СССР. Он установил, что в южных водохранилищах преобладает автохтонное органическое вещество, а в северных — аллохтонное. В торфянистых илах Рыбинского водохранилища содержание $S_{орг}$ равняется 30—35, в осадках Горьковского водохранилища — 2—5, Киевского — 3,3, Кременчугского — 2,9—5,2, Каховского — 3,3—5,5, Цимлянского, Веселовского и Новотроицкого — 1,5 %.

Примером того, как складывается баланс органического вещества водохранилища на юге европейской части СССР могут служить данные Ю. Г. Майстренко по Каховскому водохранилищу (табл. 21).

Из приведенных цифр видно, что преобладающую роль в балансе органического вещества играет его синтез фитопланктоном. Обращает на себя внимание высокий модуль седиментации органического вещества в донных осадках водохранилища. При площади последнего в 2155 км² он равняется примерно 400 т/км²·год.

Ориентировочный баланс $C_{орг}$ в Каховском водохранилище (тыс. т)

Приход	1956 г.	1957 г.	Расход	1956 г.	1957 г.
Сток из оз. им. Ленина	526,6	478,4	Сток из водохранилища	433,1	426,4
Запасы в водохранилище в начале года	38,2	156,8	Запасы в водохранилище в конце года	156,8	184,0
Синтезировано планктоном	855,0	825,0	Сток из водохранилища:		
			фитопланктона	3,0	1,9
			зоопланктона	5,6	4,5
			Вылов рыбы	0,6	0,5
			Отложение на дне	815,7	842,9
Всего	1419,8	1460,2	Всего	1414,8	1460,2

Высокие запасы органического вещества в донных осадках сочетаются со значительным присутствием в них биогенных веществ. В связи с этим С. Л. Вендров рассматривает донные илы равнинных водохранилищ как огромный потенциальный источник удобрений.

Однако пока биогенные вещества донных илов, в особенности на водохранилищах со значительными колебаниями уровня, служат существенным фактором их эвтрофикации, поскольку эти вещества при взмучивании донных осадков то и дело возвращаются в воду. Кроме того, по-видимому, далеко не каждое водохранилище может быть использовано для добычи из него илов-удобрений из-за загрязнения последних тяжелыми металлами, поверхностно-активными веществами и ядохимикатами. Такое загрязнение имеет место там, где к водохранилищу примыкают крупные города, горнодобывающие центры или поля, интенсивно обрабатываемые пестицидами.

Осадконакопление. Создание водохранилища может быть лишено всякого смысла, если оно не опирается на обоснованный прогноз темпов его будущего заиливания. В настоящее время уже существуют водохранилища, полностью выполненные наносами и лишенные функции накопителя и регулятора речных вод. Однако поскольку прогнозы заиливания искусственных водоемов в большей или меньшей степени отличаются от натуральных наблюдений, изучение заиливания водохранилищ является практически важным.

Н. В. Буторин и соавторы изучили площадное распределение донных осадков в верхневолжских водохранилищах (табл. 22).

Как видно из табл. 22, верхневолжские водохранилища в большей мере заполняются илами, часто опесчаненными. При этом в них сохраняются значительные площади, лишенные донных осадков. Песчаные наносы откладываются в Угличском во-

Распространение донных отложений в верхневолжских водохранилищах
(в % от общей площади)

Тип осадков	Водохранилище		
	Иваньковское	Угличское	Рыбинское
Незаиленные почвы	41	19	55
Пески и илистые пески	10	17	20
Песчанистые серые и серые илы	45	64	8
Торфянистый ил	—	—	13
Переходный ил	—	—	4
Отложения из макрофитов	4	<1	<1

дохранилище на глубинах менее 2 м, в Иваньковском — на глубинах до 4 м, а в Рыбинском — до 10 м.

Перестройка рельефа дна водохранилища начинается одновременно с его наполнением. Принято выделять два периода в его развитии: 1) становление подводного рельефа, сопровождающееся более интенсивным поступлением наносов, и 2) стабилизация этого рельефа, происходящая при умеренном поступлении наносов в водохранилище и ведущем значении процесса перераспределения наносов.

Каждый этап включает две стадии. Первая совпадает с периодом первоначального заполнения водохранилища до НПУ и характеризуется выработкой абразионных уступов, которые по мере подъема уровня уходят под воду и становятся новыми элементами рельефа дна. Во вторую стадию продолжается интенсивное обрушение приглубых берегов и формируются основные элементы рельефа дна. В пределах мелководий начинается волновое выравнивание дна, а в глубоководной зоне — первичная планировка рельефа. Длительность этой стадии может превышать 20—40 лет.

Второму периоду свойственно заметное уменьшение поступления материала от абразии и возрастания роли твердого стока с водосбора и потока автохтонного органического вещества. В течение первой стадии этого периода ведущую роль в формировании ложа водохранилища играет вдольбереговое движение наносов, отчленение заливов и их занос осадочным материалом. Осуществляется также медленное зарастание мелководий. Во вторую стадию рельеф ложа водохранилища формируется в результате аккумуляции материала все дальше от берега, что приводит к отчленению некоторых районов водохранилища и к выравниванию дна. Продолжительность этого этапа может достигать нескольких сотен лет [5].

О том, какую роль играют в заиливании ряда волжских водохранилищ основные источники поступления осадочного мате-

риала и какими темпами идет седиментация в первый период развития их дна, свидетельствуют данные Н. А. Зиминовой (табл. 23).

Таблица 23

Среднее многолетнее соотношение компонентов баланса взвешенных веществ и темпы осадконакопления в волжских водохранилищах

Водохранилище	Период наблюдений, гг.	Приход, %			Расход, %		Модуль седиментации т·км ² /год
		Сток речных наносов	Абразивные процессы	Продукция планктона и высшей водной растительности	Седиментация	Сброс через гидросору-жения	
Иваньковское	1937—1968	29	66	5	71	29	1500
Угличское	1940—1968	39	58	3	56	44	1100
Рыбинское	1941—1965	18	80	2	95	5	900
Горьковское	1957—1966	17	82	1	95	5	—
Куйбышевское	1956—1966	41	58	1	98	2	—

Приведенные в табл. 23 данные показывают, что при наличии каскада водохранилищ наибольшую роль в их заиливании играют продукты разрушения берегов и мелководий. За 32 года существования относительно небольшое (1,12 км³) Иваньковское водохранилище потеряло около 2% объема и таким образом скорость уменьшения его емкости равнялась 0,07% в год. Немногом более 1% емкости потеряло за 25 лет Рыбинское водохранилище. Следовательно, средняя скорость убывания его емкости за срок 25 лет равняется 0,04% в год.

Несколько быстрее заиливается Новосибирское водохранилище, теряющее около 0,2% в год своей емкости.

Закономерное снижение скорости потери емкости крупных равнинных водохранилищ хорошо показано Б. И. Новиковым. Он проанализировал данные о заилении 13 крупных водохранилищ (пяти днепровских, четырех волжских, двух камских, донского и обского). Продолжительность заилиения этих водохранилищ колебалась от 3 до 32 лет. Средняя мощность ила составляла в водохранилищах Волги 5—6,5, а в остальных 9—13,5 см и оказалась мало зависящей от продолжительности седиментации. Средние значения интенсивности заилиения за первые три года составляют 5—15 см/год, при осреднении за 5—10 лет — 0,6—2,2, за 10—15 лет — 0,6—1,6 и за 15—32 года — 0,2—0,5 см/год. Приплотинные участки водохранилищ и затопленные русла заиливаются в 1,5—3,5 раза интенсивнее.

Снижение средней скорости роста слоя донных осадков в водохранилищах объясняется не только прогрессивным уменьшением поступления осадочного материала, но и уплотнением этого слоя по мере аккумуляции.

Для прогноза срока заилиenia водохранилищ американские авторы используют статистику по седиментации в них в зависимости от размеров. Согласно Г. Глимпфу, водохранилища США с объемом более 1,24 км³ ежегодно теряют в среднем около 0,16 % емкости, для водохранилищ с объемом от 12,4 до 124 тыс. м³ этот показатель в среднем составляет 2,7 %, а для водохранилищ с объемом менее 12,4 тыс. м³ — в среднем 3,5 %.

Однако в экстремальных случаях заполнение водохранилищ происходит очень быстро. Это в первую очередь относится к горным водохранилищам, созданным на реках с аномально высоким твердым стоком. Такой случай описан Д. П. Финаровым. Он указывает, что Чирюртское водохранилище на р. Сулак — одной из наиболее мутных на Кавказе и, по-видимому, в мире — заилилось на 100 % своего объема (94—95 млн. м³) в течение 10 лет (с 1959 по 1968 г.).

В настоящее время в водохранилищах мира аккумулируется огромное количество осадочного материала, вполне соизмеримое с речным твердым стоком в океан.

Зона подтопления

Образование водохранилища обычно сопровождается увеличением запасов подземных вод на окаймляющей площади. Например, в зоне влияния крупных равнинных водохранилищ на Волге и Каме повышение уровня подземных вод в связи с подпором захватило по ширине километровую полосу, вытянутую на несколько тысяч километров. Запасы подземных вод здесь стали исчисляться десятками кубических километров. В районе г. Нового Братска уровень водоносного горизонта в песчаниках после создания водохранилища поднялся более чем на 100 м [18].

Подъем уровня грунтовых вод вызывает подтопление низинных участков, примыкающих к водохранилищу. В подзоне сильного подтопления (с глубиной залегания грунтовых вод менее 1 м) в гумидных областях происходит заболачивание, а в аридных — вторичное засоление почв. В подзонах умеренного и слабого подтопления грунтовые воды в основном находятся соответственно на глубинах 1—2 и 2—3 м от поверхности. В этих подзонах также наблюдается интенсивная трансформация почвогрунтов.

По данным С. А. Филипповой, большой негативный эффект от подтопления имеет место в областях развития трещиноватых карстующихся карбонатных и загипсованных пород. Так, подтопленные Братским водохранилищем сельскохозяйственные земли, располагающиеся в месте развития указанных пород, нарушаются деформациями и провалами из-за активизации карста, суффозии и подземного размыва. В прибрежной полосе

шириной 50—100 м выщелоченные черноземы деградируют из-за вторичного засоления с образованием корковых солончак и часто с накоплением гипса.

Нижний бьеф

Трансгрессивная эрозия. Основным процессом в нижнем бьефе водохранилища является ускоренная глубинная эрозия. Она возникает из-за того, что русло реки до зарегулирования взаимодействовало с потоком с определенным, нередко значительным содержанием наносов. С того момента, как большая часть речного твердого стока начала оставаться в водохранилище, характер взаимодействия между руслом и осветленным потоком становится иным и оказывается направлено на восстановление прежней — бытовой мутности реки.

Глубинная эрозия, как указывает Н. И. Маккавеев, в начале проявляется на приплотинном участке реки и затем трансгрессивно распространяется вниз по течению. Скорость продвижения «переднего фронта» трансгрессивной эрозии составляет на больших равнинных реках несколько километров, а на горных — несколько десятков километров в год.

Глубинная эрозия резко преобладает над боковой. Размыв берегов становится менее интенсивным, чем до зарегулирования реки. Заметно меняется форма сечения русла, ложе речного потока расширяется в придонных слоях и средняя глубина русла увеличивается. Происходит снижение уровня воды в реке, особенно заметное при малых расходах.

Скорость снижения уровня зависит от уклона и расхода воды и, кроме того, от состава донных отложений. На различных гидроузлах она колеблется от 1—2 см до нескольких десятков сантиметров в год.

Если под русловым аллювием залегают рыхлые отложения, то в этом случае трансгрессивная глубинная эрозия должна приводить к значительной трансформации продольного профиля реки. Меняется и поперечное сечение русла. По мере врезания главного водотока отмирает большинство второстепенных рукавов. Примером может служить р. Обь. На ней глубинная эрозия ниже Новосибирского водохранилища распространяется вниз по течению со скоростью 12—15 км в год. При этом изменяется форма живого сечения русла: местами средняя глубина и ширина последнего за 20 лет увеличились более чем в два раза. Большой объем карьерных разработок аллювиальных песков в русле привел к значительному увеличению емкости русла непосредственно вблизи плотины. Это привело к дополнительному снижению уровней, достигнутому в итоге 1,5 м по сравнению с бытовым режимом.

Снижение уровня половодья на зарегулированных реках приводит к интенсивной глубинной эрозии в низовьях прито-

ков. Благодаря этому из них выносятся такое количество наносов, которое не в состоянии сразу удалить зарегулированная река. Так, Северный Донец в первые годы эксплуатации Цимлянского водохранилища буквально перекрывал своими выносами русло нижнего Дона, а глубина плесов в низовьях названного притока увеличилась в 2—3 раза.

Ускоренная глубинная эрозия в нижних бьефах водохранилищ продолжается до тех пор, пока не установится новое равновесие между речным потоком и руслом. До этого времени идет интенсивное удаление материала с речного дна, происходящее на очень большом его отрезке. Например, на р. Оби ниже Новосибирского водохранилища восстановление бытовой мутности происходит лишь через 500—600 км, а на р. Енисей ниже Красноярского водохранилища — более чем через 1000 км.

Насыщение осветленных вод наносами, как указывают К. М. Капитонов и соавторы, осуществляется в первую очередь за счет вымывания из донных отложений мелких фракций. Поэтому всюду, где такое вымывание имеет место, происходит огрубение поверхностного слоя русловых образований. После нескольких лет эксплуатации донные отложения становятся хорошо промытыми и поддаются интенсивному взвешиванию только при форсированных сбросах воды из верхних бьефов, например в период паводков.

В условиях небольших и средних сбросов воды преобладающим видом транспортирования наносов в нижнем бьефе является их перемещение в придонном слое потока. После строительства плотины им. Гувера на р. Колорадо произошло углубление ее русла на расстоянии около 150 км. При этом в нижерасположенное водохранилище Хаваси было дополнительно принесено около 130 млн. м³ наносов.

Однако не на всех реках может происходить полное восстановление бытовой мутности при их зарегулировании. Так, Г. Н. Ган сообщает, что на Волге и Дону расстояние от устья до нижних плотин оказывается для этого недостаточным. О том, как уменьшилась их мутность после зарегулирования можно судить по данным табл. 24.

С усилением эрозии в нижнем бьефе водохранилища связана трансформация поймы в нижнюю надпойменную террасу. Прекращение осадконакопления на пойме и понижение уровня грунтовых вод приводят к превращению почвы из гидроморфной в автоморфную. В связи с этим же меняется и состав растительности. Например, на пойме Дона луговая растительность была замещена степной, в связи с чем здесь стали проявляться эоловые процессы.

Одним из неожиданных последствий строительства плотин на сибирских реках стало подтопление земель на отдельных участках в нижнем бьефе, подтопление возникает при формиро-

Характеристика стока воды и наносов в вершинах устьевых областей Волги и Дона в бытовых условиях (а) и после зарегулирования (б)

Река	Гидрораствор	Период наблюдений, гг.	Средний многолетний расход воды, м ³ /с			Среднегодовой сток наносов, млн. т	Среднегодовая мутность, г/м ³
			максимальный	годовой	минимальный		
Волга	В. Лебяжье	1940—1955 (а)	25 200	7300	3317	12,8	55
		1956—1969 (б)	21 900	7235	4301	9,0	39,5
Дон	Раздорская	1934—1951 (а)	4 560	774	121	6,8	184
		1952—1969 (б)	2 087	710	170	3,8	112

вании заторов из шуги в незамерзающей части реки. На некоторых реках протяженность незамерзающей части очень велика. Так, на Енисее ее длина определена в 50—280 км.

Разрушение плотин и катастрофические прорывы воды. Это явление возникает из-за недоучета эффекта геодинамических процессов, связанных с образованием плотины и водохранилища.

О причинах разрушения нескольких плотин в США было сообщено на международном симпозиуме «Проблемы инженерной геологии в гидротехническом строительстве» в Тбилиси в сентябре 1979 г. Тетонская земляная плотина высотой 93 м, сооруженная на р. Тетон в США, разрушилась в 1976 г. Течь, возникшая в правом примыкании, быстро увеличивалась. Несмотря на попытки ее закрыть, образовался прорыв воды с паводковой волной высотой 9 м. Было размывто 40 % тела плотины и 115 000 м³ пород примыкания. Прорыв прибрежного примыкания произошел в результате интенсивной миграции глинистых материалов, слагавших ядро плотины, в открытые трещины скальных пород примыкания.

Разрушение земляной плотины Сан-Фернандо в районе Лос-Анджелеса явилось результатом сильного землетрясения (магнитуда 6,6) в 1971 г. Под действием ускорения 0,5 g произошли потеря прочности глинистыми породами основания и глинистыми материалами тела плотины, их разжижение и оползание.

Наиболее вероятной причиной аварии земляной плотины Бодвин Хил в штате Калифорния в 1963 г. является проседание области водохранилища, вызванное нефтяными разработками.

Катастрофическое переливание воды через плотину. Примером этого явления может служить наводнение на р. Пьяве в Италии в октябре 1963 г. Водоохранилище, об-

разованное одной из крупнейших арочных плотин, неожиданно переполнилось, когда в него сполз крупный оползень. Перелившись через гребень плотины, вода устремилаь по руслу реки, но быстро переполнила его, затопила и разрушила г. Лангорне. При этом несколько тысяч человек погибло.

К сожалению, в источниках, из которых заимствованы данные о разрушении плотин и связанных с этим катастрофических наводнениях, нет сведений о геологической работе прорвавшихся вод. Несомненно, однако, что результаты их деятельности были очень значительны.

Каналы

Своеобразными антропогенными объектами являются каналы. Они создаются для разных целей и занимают неодинаковое положение в составе природных подразделений гидросферы. Каналы могут быть искусственными фрагментами Мирового океана, т. е. являться самотечными морскими. Каналы, связанные с водоемами суши, тоже бывают самотечными, но, кроме того, и с искусственной подачей воды с низких отрезков на гипсометрически более высокие.

Если морские каналы строятся почти исключительно для транспортных целей, то на суше искусственные водные артерии имеют более широкое хозяйственное назначение. Они устраиваются не только для создания водных путей сообщения (судоходные каналы), но и для подачи воды на орошаемые поля, осушения переувлажненных территорий и для получения электроэнергии, лесосплава и водоснабжения. Многие каналы используются одновременно для нескольких целей.

В зависимости от назначения каналы могут различаться по своему положению в рельефе. Так, ирригационные каналы проводят по возвышенным по отношению к орошаемым угольям местам. В этом случае вода самотеком может поступать на поля. Осушительные каналы устраиваются в наиболее пониженных местах. Деривационные каналы, подводящие воду из реки к гидроэлектростанциям, проводятся с уклонами, значительно меньшими, чем уклоны реки, из которой они забирают воду и, следовательно, трассируются по линии, отклоняющейся от простираения главных элементов дна долины.

Для борьбы с фильтрацией в каналах часто устраивают глиняный экран, представляющий собой слой глины мощностью 5—10 см, положенный на дно и откосы. Выше накладывается защитный слой грунта мощностью не менее 15—30 см. Существуют и другие способы борьбы с фильтрацией.

Для предохранения от размыва создается одежда канала из хвороста, камня, бетона, железобетона или асфальтобетона. Кроме того, производится укрепление подводных откосов инженерно-техническими или биологическими методами.

В голове канала устраивается водозаборное сооружение, а на трассе — шлюзы и насосные станции.

Сооружение крупных каналов всегда связано с гигантскими по масштабам земляными работами. В 18 странах Европы длина судоходных каналов к 1958 г. составляла 36 900 км. При их строительстве было вынуто более 33 км³ грунта. В то же время объем земляных работ при сооружении всех морских каналов составляет лишь 2 км³ [40].

В России создание судоходных каналов началось при Петре I. Строительство канала между реками Тверцой и Цной длилось с 1703 по 1709 г. Этот канал длиной около 30 км образовал Вышневолоцкую соединительную систему, по которой суда могли проходить непрерывно водным путем от Волги к Петербургу.

Всего до революции за двести с лишним лет, как указывают И. М. Карпов и В. В. Фандеев, было построено около 800 км искусственных судоходных каналов.

После революции в СССР построены такие крупные водно-транспортные системы, как Беломоро-Балтийский канал и канал им. Москвы, сданные в эксплуатацию соответственно в 1933 и 1937 гг. Гигантом довоенных строек в Средней Азии является Большой Ферганский канал, пропускающий 100 м³/с воды и имеющий длину 275 км. В 1952 г. вступил в строй Волго-Донской канал им. Ленина. Не прекращается строительство одного из крупнейших каналов в Европе Днепр—Донбасс, расширяется Северо-Крымская оросительная система — самая крупная в европейской части СССР. Сравнительно недавно начал функционировать канал Иртыш—Караганда.

Представление о том, насколько сложной водохозяйственной системой является крупный канал, можно составить по сведениям о канале им. Москвы, заимствованным из работы Г. Г. Гангардта и Н. Н. Древальской.

Основное назначение канала им. Москвы — снабжение питьевой водой г. Москвы. Попутно решаются задачи водного транспорта, энергетики и обводнения р. Москвы и ее притоков.

Канал начинается из Ивановского водохранилища на р. Волге и проходит почти меридионально до с. Шукино на р. Москве. Общая протяженность его 128 км, из них 19,4 он проходит по водохранилищам и 108,6 — по искусственному руслу. Соответственно рельефу местности канал на протяжении 32 км проходит в выемке, наибольшая глубина которой достигает 23,5 м, на протяжении 68 км — в полувыемке-полунасыпи и на протяжении 28 км — в дамбах, наибольшая высота которых доходит до 14 м.

Уровни воды на реках Волге и Москве подняты плотинами. Высота подъема воды с р. Волги на водораздел равняется

38 м. Ее подъем осуществляется 5 насосными станциями. При строительстве канала объем земляных работ составил 154 млн. м³. Это позволило сделать его широким (по дну 46 м). Поперечное сечение канала трапециoidalной формы с откосами 1 : 4 на высоту 4 м от дна и далее с откосами 1 : 2,5. В пределах воздействия судоходной волны откосы укреплены каменной кладкой. Участки в проницаемых грунтах общей протяженностью 15 км покрыты экраном из суглинистых грунтов.

Расчетный расход канала (м³/с): летний — 131,5, зимний — 83,0.

На канале построено свыше 240 сооружений. Главнейшими из них являются 9 земляных и 3 водосливных плотины, 4 гидроэлектростанции, 11 шлюзов, 5 насосных станций.

Питьевая вода подается по специальному водопроводному каналу, берущему начало на водораздельном участке из Учинского водохранилища. На случай ремонта канала предусмотрен второй водозабор из Пяловского водохранилища.

В третьей четверти XX в. в СССР вступили в строй мощные оросительные системы, действующие на юге страны, и к концу этого срока общая длина оросительных каналов в стране превысила 500 тыс. км.

Огромный экономический эффект, получаемый за счет этих мероприятий, намного превосходит негативные последствия эксплуатации оросительных каналов, тем более, что некоторые процессы-следствия в зонах каналов могут рассматриваться как положительные. Естественно, что чем крупнее канал, доставляющий воду к массивам орошаемых земель, тем сложнее и напряженнее осуществляются экзодинамические процессы, связанные с его функционированием. Таким является Каракумский канал им. В. И. Ленина.

Строительство Каракумского канала было жизненно важно для развития экономики Туркменской ССР. В 1975 г. были сданы в эксплуатацию три очереди канала. Он протянулся от Амударьи через Мургабский и Тедженский оазисы вдоль северной подгорной равнины Копетдага до Геок-Тепе (рис. 11). Общая длина его достигла 837 км, ширина в пределах первой очереди примерно 100 м, а скорость течения — 0,5—1 м/с. Площадь земель, пригодных для орошения, достигает в зоне канала 4,3 млн. га.

Все производственные затраты на строительство канала и освоение земель окупались в процессе его строительства и к началу 1972 г. чистая прибыль составила 1016,1 млн. руб.

Каракумский канал приспособлен к естественному снижению поверхности от +250 м на Амударье до —28 м у Каспийского моря. Общий уклон к западу в среднем составляет 0,25 м/км.

В зоне канала развиты мощные четвертичные отложения аллювиального, пролювиального и эолового генезиса. Поэтому

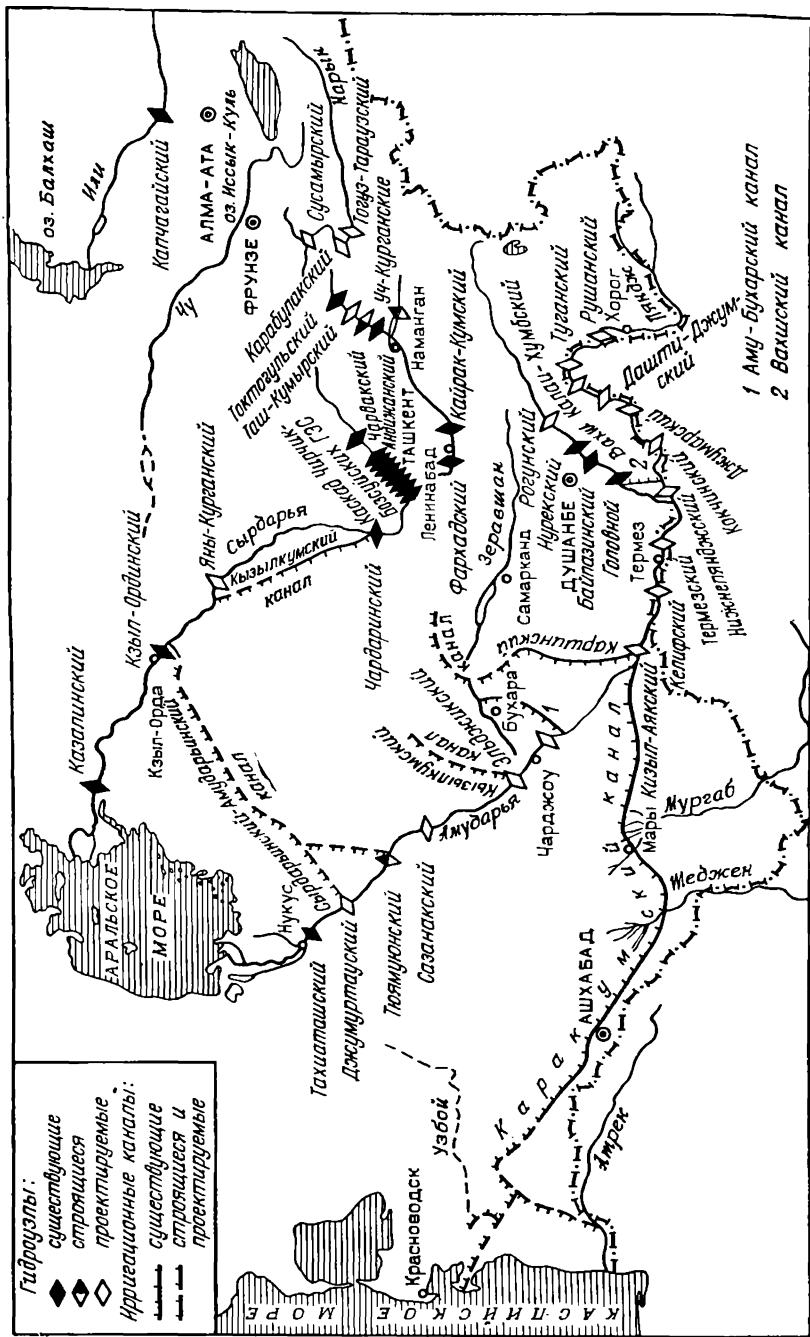


Рис. 11. Схема водохозяйственных объектов юга Средней Азии СССР (по А. Б. Авакяну и В. А. Шарипову, 1977 г.)

канал проходит преимущественно в мелкоземистых грунтах, среди которых преобладающую роль играют грунты, обладающие высокой водопроницаемостью.

Среди процессов, имеющих место в зоне канала, главными можно считать следующие: 1) эрозия и аккумуляция в искусственном русле; 2) увеличение минерализации воды; 3) зарастание русла и берегов; 4) фильтрация и связанные с нею явления.

Эрозия и аккумуляция. Каракумский канал, как пишут С. А. Аннаев и Б. К. Балакаев, работает круглогодично с регулированием свободного зимнего стока в Хаузханском и Ашхабадском водохранилищах. Режим работы Каракумского канала близок к режиму р. Амударьи. Минимальные расходы воды канала имеют место зимой, когда в его головной части они составляют 140—150 м³/с, максимальные в середине лета (360 м³/с).

При водозаборе в Каракумский канал поступает значительное количество взвешенных наносов. При этом большая часть наиболее крупных фракций осаждается в подводящих каналах еще до головного сооружения. Некоторое представление об этом процессе дают сведения об объемах ежегодной очистки подводящих каналов. В 1960 г. с их дна извлекалось 1750 тыс. м³ наносов, в 1961 г.—1090, в 1967 г.—4160, в 1968 г.—5160 тыс. м³.

Поступление наносов в Каракумский канал составляет около 30 млн. т в год, причем 76 % этого количества приходится на весенне-летний период, а остальные 24 % — на осенне-зимний. Наносы транспортируются до Келифских озер, где происходит их осаждение.

Келифские озера в настоящее время близки к полному заилению. Вода из них выходит чистой с ничтожным содержанием наносов. Тем не менее ниже озер русло канала непрерывно видоизменяется. По его дну, как пишет Б. Ф. Снисченко, перемещаются скопления наносов самых различных размеров: гряды длиной в несколько метров, побочни и осередки длиной в десятки и сотни метров.

За счет разрушения берегов, размываемых потоком, судовыми и ветровыми волнами, а также выпадения золотого материала мутность воды в канале ниже Келифских озер постепенно возрастает. Ее значения колеблются от 15 до 106 мг/л на участке 100—300 км и от 150 до 300 мг/л на участке 300—745 км. Преобладающими фракциями наносов вод Каракумского канала являются частички с размерами 0,05—0,01 и < 0,01 мм.

Заиление канала идет такими темпами, что для борьбы с этим процессом применяются более ста земснарядов. Они не только освобождают канал от наносов, но и планомерно расширяют русло для пропуска по нему больших объемов воды.

На канале, подобно нормальной реке, сейчас развились излучины, возникли плесы и перекаты. Озерные котловины, полностью выполненные наносами, стали напоминать русла рек, находящиеся в стадии агградации и характеризующиеся наличием многочисленных протоков и островов.

Сила боковой эрозии на канале такова, что в местах, где он проходит в насыпи, постоянно ведутся работы по предупреждению прорыва дамб, ограничивающих канал.

Возрастание минерализации в воды вниз по каналу представляет собой серьезное негативное явление. Оно происходит в основном за счет вымывания солей и потерь на испарение, особенно значительных на озерах. В целом минерализация воды меняется примерно от 250—300 мг/л в пределах нижнего двухсоткилометрового отрезка канала до 450—600 мг/л на отрезке 450—500 км. Учитывая, что минерализация воды свыше 500 мг/л отрицательно сказывается на урожайности культур, необходимо проведение мер, препятствующих чрезмерному проявлению рассмотренного процесса. Одной из таких мер может быть увеличение расходов воды в канале в будущем.

Заращение. Развитие водной растительности происходит особенно интенсивно на участках с низкими скоростями течения, т. е. главным образом в озерах и водохранилищах. Заращение дна, развитие планктона и эвтрофикация приводят к снижению качества воды в канале. Одновременно уменьшается его пропускная способность.

Образование полосы наземной растительности вдоль берегов канала изменило структуру теплового баланса этой ожившей части пустыни. В естественной пустыне поглощаемое тепло расходовалось на турбулентный теплообмен и эффективное излучение, с появлением же после проведения канала пышной влаголюбивой растительности большая его часть стала расходоваться на испарение путем транспирации. Аналогичные изменения, хотя и в несколько меньших масштабах, произошли на всех вновь созданных орошаемых угодьях.

Естественным следствием всего этого является существенное преобразование в зоне канала микроклимата и связанных с ним таких факторов экзодинамики, как гидротермический режим, режим ветров и др.

Фильтрация. Основную часть общих потерь воды в Каракумском канале составляют потери на фильтрацию. Они достигали первоначально 65—50 % общего расхода воды. По мере увеличения времени эксплуатации канала потери воды стали меньше и составили в 1970 г. 20—30 %.

Вне оазисов фильтрация вод из Каракумского канала сопровождается подъемом и формированием грунтовых вод на прилегающей к каналу местности. Однако этот процесс пока не привел к широкому развитию солончаков. Например, за

время работы первой очереди канала воздействие фильтрационных вод проявилось на площади порядка 4500—5000 км², из них к концу 1974 г. солончаки занимали всего 40 км². При этом часть из них существовала здесь и ранее.

Воздействие фильтрационных вод проявляется преимущественно в пределах полосы 5—25 км по обе стороны от канала. При этом в понижениях рельефа возникают фильтрационные озера или заболоченность.

Дополнительное поступление амударьинских вод в дельты Мургаба и Теджена при несовершенстве систем орошения в пределах оазисов и слабом развитии дренажных систем повлекло за собой быстрый подъем уровня грунтовых вод, а это привело к вторичному засолению почв [13].

Просадки на оросительных каналах. Эти процессы имеют широкое развитие при создании каналов в просадочных породах.

А. А. Мустафаев проанализировал особенности просадочных явлений на различных оросительных системах Закавказья, Северного Кавказа и Средней Азии и пришел к выводу об их сходстве. Большинство каналов, на которых наблюдались и наблюдаются просадки, проходят в областях развития покатых предгорных равнин, сложенных пролювиальными отложениями. Грунты просадочных участков в основном состоят из лёссовидных суглинков, которым свойственны большая пористость и низкая влажность.

Возникают просадки обычно после первого пропуска воды — иногда через несколько дней, а иногда и через несколько часов и продолжают в течение ряда лет, постепенно затухая. Просадка грунтов проявляется прежде всего в оседании дна канала и прилегающих к нему участков. Просадка дна сопровождается нарушением целостности массива, который распадается на ряд террас, разделенных зияющими трещинами. Последние в большинстве своем располагаются параллельно каналу, окаймляя его с обеих сторон. Поскольку не все участки канала испытывают просадку, то распространение трещин носит очаговый характер. Там, где просевший участок заканчивается, трещины приближаются к каналу, пересекают его и смыкаются с трещинами с другого берега. Террасы проседания, заключенные между трещинами, образуют обычно несколько эллипсов проседания, вложенных друг в друга и вытянутых вдоль оси канала. Длина этих эллипсов бывает различна. На одних объектах она достигает нескольких десятков метров, на других эллипсы проседания, накладываясь друг на друга, образуют протяженные участки свыше 1 км.

Просадка дна обычно достигает 1, в редких случаях 2 м. Ширина трещин не превышает нескольких дециметров. Книзу трещины сужаются и на глубине искривляются в сторону канала. Максимальная глубина их 10—15 м. Террасы смещаются

друг относительно друга на 0,5 м каждая. Самые значительные просадки имеют место на территориях с глубоким залеганием грунтовых вод. На равнинах просадки дна канала могут существенно не повлиять на его работу. Однако в условиях пересеченного рельефа даже небольшие деформации легко приводят к прорывам бортов канала.

Для борьбы с последствиями просадок дна каналов предложен ряд мер. А. А. Мустафаев считает, что хорошие результаты дает заполнение пульпой трещин, образовавшихся при просадках.

На основании вышеизложенного можно заключить, что современная хозяйственная деятельность человека немыслима без создания и использования водохранилищ и каналов. Экзодинамические процессы, связанные с этими антропогенными водными объектами, отличаются по степени зависимости от действий человека. Режим наземных каналов почти полностью задается и регулируется человеком. Поэтому большинство экзодинамических процессов в зоне канала являются антропогенными процессами-следствиями. Этого нельзя сказать о водохранилищах, питаемых речными водами.

Экзодинамическое воздействие крупного водного тела на вмещающий его ПЭК во многом развивается стихийно. Как бы человек не варьировал пропусками воды в нижний бьеф, он не может приостановить абразию берегов, заиливание дна и др. Функционирование этих и других природно-антропогенных процессов обеспечивается видоизмененной структурой ПЭК в сочетании с действующими в рамках этой структуры природными силами.

Для функционирования наземного канала, как правило, необходимо расходовать энергию. Для существования крупного долинного водохранилища этого можно не делать длительный срок. Такова принципиальная разница между наиболее типичными представителями двух рассмотренных категорий водохозяйственных объектов.

ДОБЫЧА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ЕЕ СЛЕДСТВИЯ

Извлечение полезных ископаемых из земной коры — одна из важнейших основ современного производства.

Месторождение полезного ископаемого — это участок земной коры, где в результате тех или иных геологических процессов произошло накопление вещества, по количеству, качеству и условиям залегания пригодного для промышленного использования [36]. Полезные ископаемые делятся на газообразные, жидкие и твердые. По промышленному использованию их также разделяют на следующие группы: 1) рудные или металлические; 2) нерудные или неметаллические; 3) горючие или каустобиолиты; 4) гидроминеральные.

Полезное ископаемое используется для нужд производства как непосредственно без предварительной переработки, так и для извлечения из него необходимых компонентов. В последнем случае оно представляет собой руду. Извлечение полезных компонентов из руды осуществляется при различных их содержаниях (табл. 25).

Таблица 25

Примерные минимальные промышленные кондиции для коренных рудных месторождений [36]

Группа металлов	Типичные представители	Минимальные содержания металла, %	Минимальные масштабы запасов, т	Запасы крупных месторождений, т
Черные	Железо, марганец	20—25	Сотни тысяч	Миллиарды
Цветные	Медь, свинец, цинк, никель	0,5—1	Тысячи—десятки тысяч	Десятки миллионов
Редкие	Вольфрам, молибден	0,1—0,2	Десятки—сотни	Сотни тысяч
Радиоактивные	Уран, торий	0,05—0,1	Десятки—сотни	Сотни тысяч
Благородные	Золото, платина	0,0005	Килограммы	Десятки тысяч

Для получения металлов, как свидетельствует табл. 25, а также ряда других твердых полезных ископаемых человек вынужден извлекать из земной коры огромные массы горных пород.

М. И. Хазанов [40] подсчитал, какие количества руды и горной массы в среднем приходится на каждую тонну выплавленного металла, и получил следующие цифры: на 1 т железа—1,9 т; алюминия—5,84; цинка—60; свинца—70; меди—95; никеля—200; ртути—400; серебра—1300; олова—2218; вольфрама—25 700; золота—23 200 000 и платины—56 125 000 т. В свете этих данных показательны его же цифры о массовых количествах металлов, а также углерода, полученных человеком за время их интенсивного использования. Цифры приводятся в виде дробей, где числитель отражает количество того или иного элемента, полученное до 1963 г., в основном в течение XIX в. и позднее, а знаменатель— количество за период 1963—1980 гг. Хотя оценки, сделанные для второго этапа, были прогнозными, они также представляют интерес. Приводим цифры М. И. Хазанова в тоннах.

C	Fe	Cu	Pb	Zn
$\frac{9,9 \cdot 10^{10}}{7,1 \cdot 10^{10}}$	$\frac{7,7 \cdot 10^9}{8 \cdot 10^9}$	$\frac{1,3 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^8}$	$\frac{1,1 \cdot 10^8}{1,9 \cdot 10^8}$	$\frac{1,1 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^8}$
Sn	Ni	Al	Hg	Mn
$\frac{1 \cdot 10^7}{4,7 \cdot 10^6}$	$\frac{6,4 \cdot 10^6}{1,8 \cdot 10^8}$	$\frac{6 \cdot 10^7}{3,2 \cdot 10^8}$	$\frac{4,7 \cdot 10^5}{2,6 \cdot 10^5}$	$\frac{2,9 \cdot 10^5}{7,9 \cdot 10^8}$

Cr	W	Mo	Co	Au
$\frac{1,6 \cdot 10^8}{5,2 \cdot 10^8}$	$\frac{1,2 \cdot 10^6}{1,5 \cdot 10^6}$	$\frac{6,2 \cdot 10^5}{1,2 \cdot 10^6}$	$\frac{2,3 \cdot 10^5}{5,6 \cdot 10^5}$	$\frac{6,4 \cdot 10^4}{4,3 \cdot 10^4}$
Ag	Pt	Sb	Be	
$\frac{8,1 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 10^5}$	$\frac{9,8 \cdot 10^2}{1,4 \cdot 10^3}$	$\frac{1,1 \cdot 10^6}{3,1 \cdot 10^5}$	$\frac{2,1 \cdot 10^4}{8,3 \cdot 10^4}$	

Этим же автором вычислен объем отвалов, образовавшихся в результате горнотехнической деятельности человека (табл. 26).

Т а б л и ц а 26

Объем образовавшихся отвалов искусственных грунтов на земном шаре в процессе горнотехнической деятельности (в км³) [40]

Полезные ископаемые	Отвалы пород			Отвалы производственных отходов (шлаки, золы и др.)			Итого
	До 1962 г.	1963—1980 гг.	Сумма	До 1962 г.	1963—1980 гг.	Сумма	
Рудные	704,0	506,0	1210,0	4,0	3,9	7,9	1217,9
Нерудные	32,0	58,0	90,0	—	—	—	90,0
Топливо	125,0	153,0	278,0	5,8	6,4	12,2	290,2
Всего	861,0	717,0	1578,0	9,8	10,3	20,1	1598,0

Из сопоставления приведенных цифр М. И. Хазанова видно, что отвалы, а соответственно и выемки, изменившие строение земной коры вследствие получения металлов, в десятки—сотни раз больше по объему самого полезного вещества. Масштабы нарушений в земной коре, связанных с извлечением топлива, несколько меньше. Однако количество сожженного ископаемого топлива так велико, что оно уже привело к ощутимому изменению состава атмосферы.

В настоящее время при горных разработках ежегодно перемещается около 100 млрд. т породы [18], а к 2000 г. этот показатель должен увеличиться примерно в шесть раз.

Способы добычи полезных ископаемых подразделяются на открытые и подземные разработки. Специфическим видом подземной добычи является извлечение газообразных и жидких полезных ископаемых через скважины.

Массированное наступление горнодобывающей промышленности на глубины земной коры влечет за собой и все возрастающее изменение ее строения. Оно возникает не только как прямой результат действия механизмов, взрывов, растворяющих веществ и микроорганизмов, с помощью которых осуществляется добыча, но и в ходе различных процессов-следствий.

Добыча твердых полезных ископаемых

При извлечении твердых полезных ископаемых осуществляется целый комплекс подготовительных, текущих и последующих сопряженных горнотехнических мероприятий. Такие мероприятия приводят к изменению геолого-геоморфологических, гидрологических, гидрогеологических и метеорологических условий в районе добычи и на смежных землях. Выемка и аккумуляция горных масс представляет собой изменение геолого-геоморфологических условий; защита горно-добывающих предприятий от затопления — изменение гидрологических и гидрогеологических условий; многие виды работ, при которых запыляется воздух, — изменение метеорологических условий. Все эти мероприятия порождают в свою очередь целый комплекс процессов-следствий, которые также затрагивают атмосферу, гидросферу и литосферу составляющие района добычи полезных ископаемых.

Особая группа мероприятий проводится в пределах площади горного отвода и смежных территорий с целью уменьшения негативного эффекта всех явлений, возникающих при добыче. Наконец, самостоятельным комплексом работ можно считать рекультивацию земель, нарушенных добычей полезных ископаемых.

Антропогенные процессы-мероприятия

Мероприятия по перемещению горных масс

Добыча из карьеров. Этот способ извлечения полезных ископаемых в связи с возможностями его прогрессивного удешевления все больше вытесняет конкурирующие подземные горные работы. Согласно Е. П. Дороненко, себестоимость добычи 1 т сырой руды открытым способом в 3,5—4 раза ниже, а производительность труда примерно в 3—3,5 раза выше по сравнению с подземным способом добычи полезного ископаемого. При открытом способе разработки достигается более полная выемка полезных ископаемых.

Возможность создания глубоких карьеров (некоторые из них имеют глубину свыше 700 м) связана с применением высококорентабельной техники. Например, в Канаде при подготовке к разработке открытым способом месторождения медно-никелевых руд для удаления пород вскрыши объемом 11,5 млн. м³ применена гидравлическая всасывающая драга. Вода для нее подавалась из ближайшего озера и туда же поступала отсасываемая порода. Созданный котлован эллиптической формы достигает в длину 1,1 и в ширину 0,6 км. Недавно в Аризоне (США) началась добыча медной руды из карьера,

объем вскрытых пород в пределах которого составлял 113,3 млн. м³ [4]. В настоящее время удельный вес открытых разработок в общемировой добыче полезных ископаемых составляет 66%. Доля руд различных металлов, добываемых этим способом,—57%, угля—34% и строительных материалов—97% [23].

В США доля открытых горных работ в добыче полезных ископаемых равняется 84%. Из карьеров поступает 85% общего количества добываемых руд и 42% угля.

В СССР разработка месторождений полезных ископаемых карьерным способом быстро увеличивается. В 1975 г. объем вскрышных работ в СССР составлял 2,2 млрд. м³, а к 1990 г. он возрастет в несколько раз. Уменьшается доля добычи карьеров производственной мощностью до 1 млрд. т. В 1975 г. по сравнению с 1970 г. по Минчермету СССР число таких карьеров снизилось и составило от общего числа 39,3% при удельном весе объемов производства 3,1%. Глубина карьеров с 1970 по 1975 г. возросла на 30—50 м и более при среднегодовых темпах углубления от 5 до 12 м. Так, в 1975 г. по Минчермету СССР удельный вес карьеров, имеющих глубину от 100 до 250 м, увеличился с 28,3 до 36,1%. Согласно Н. А. Быховеру [4], доля открытого способа добычи в ее общем объеме сейчас составляет для железных руд 81%; для марганцевых руд—78,7%, для руд цветных металлов—64%, для горнохимического сырья—82% и для других неметаллических полезных ископаемых и строительных материалов—почти 100%. По данным В. Н. Новожилова на конец 70-х годов, в СССР действует более 3500 карьеров, из них более 30 глубиной выше 150 м, высота отвалов на отдельных карьерах достигает 100 м (в проекте 400 м и более); объемы отдельных гидротвалов хвостохранилищ 100—250 млн. м³ (в проекте 500 млн. м³). Самыми глубокими являются Коркинские угольные карьеры в Челябинской области—470 м. Проектная глубина некоторых карьеров превышает отметки в 600 и 700 м.

При карьерной добыче перемещение горных масс техническими средствами производится: 1) при удалении вскрышных пород с образованием отвалов, 2) при устройстве канав для отвода поверхностных вод с накоплением отвалов, 3) при извлечении полезного ископаемого, 4) при формировании отвалов из хвостов, когда имеет место обогащение руды.

Перечисленные мероприятия приводят к наиболее значительному изменению рельефа. Амплитуда высот между днищами наиболее глубоких выработок и самых высоких отвалов сейчас превысила 1100 м. Сведения об изменении рельефа суши при добыче твердых полезных ископаемых систематизированы В. А. Овчинниковым [24]. Приводим его данные, касающиеся результатов карьерной добычи, а также переработки полезных ископаемых (табл. 27).

**Формы рельефа, созданные человеком при карьерной добыче
полезных ископаемых, а также при их переработке
(по В. А. Овчинникову)**

Типы нарушенных земель	Формы рельефа	Способы и условия создания форм рельефа
<i>Формы рельефа, созданные человеком при карьерной добыче полезных ископаемых Денудационные</i>		
Карьеры (разрезы)	<p data-bbox="313 318 583 365">Выровненные мульдообразные</p> <p data-bbox="313 526 583 573">Мульдообразные гребневидные</p> <p data-bbox="313 620 583 667">Мульдообразные с останцами</p> <p data-bbox="313 683 583 730">Трапециевидные вытянутые горизонтальные</p> <p data-bbox="313 1122 583 1201">Трапециевидные террасированные вытянутые горизонтальные</p> <p data-bbox="313 1287 583 1334">Циркообразные замкнутые террасированные</p>	<p data-bbox="614 318 957 526">Разработка торфяников фрезерным способом. Разработка площадных залежей пологого падения (до 8—10°), поверхностного типа, весьма малой и малой мощности (до 10 м). Вскрыша отсутствует или весьма малой мощности. Глубина карьера до 10 м</p> <p data-bbox="614 526 957 683">Разработка указанных выше залежей с размещением вскрыши отдельными грядами на дне карьера</p> <p data-bbox="614 683 957 840">Разработка тех же залежей при выборочной выемке кондиционного сырья</p> <p data-bbox="614 840 957 1122">Разработка вытянутых залежей пологого падения, поверхностного типа, весьма малой и малой мощности (до 20 м), с перевалкой вскрыши малой и средней мощности (до 40 м) драглайнами во внешние бортовые отвалы. Оставление незаполненного отвалами выработанного пространства при разработке площадных залежей пологого падения, поверхностного типа, весьма малой и малой мощности (до 20 м), с перевалкой вскрыши малой и средней мощности (до 40 м) во внутренние отвалы экскаваторами или отвалообразователями</p> <p data-bbox="614 1122 957 1287">То же, при разработке площадных залежей пологого падения, глубинного типа, любой мощности, с перевалкой вскрыши средней и большой мощности (больше 10 м) во внутренние отвалы</p> <p data-bbox="614 1287 957 1423">Разработка залежей глубинного типа, наклонного (от 8—10 до 25—30°) или крутого (свыше 30°) падения, любой мощности, с перевалкой вскрыши во внешние отвалы</p>

Типы нарушенных земель	Формы рельефа	Способы и условия создания форм рельефа
Траншеи	Циркообразные разомкнутые террасированные	Разработка залежей высотного типа, наклонного или крутого падения, любой мощности, с перевалкой вскрыши во внешние отвалы
	Трапециевидные вытянутые наклонные (до 7°) или крутые (от 7 до 45°)	Вскрытие залежей глубинного типа. Траншея располагается вне контура карьера и обслуживает один уступ
Канавы	Трапециевидные террасированные вытянутые наклонные или крутые (до 18°) выемки	То же. Траншея обслуживает несколько (группу) или все уступы карьера до конечной глубины
	Вытянутые пологие (до 1°) неглубокие (до 5 м) выемки трапециевидного или треугольного сечения	Ограждение карьера от затопления и отвод воды

Аккумулятивные

Внешние отвалы	Плоские (гидроотвалы)	Отвалообразование с применением гидротранспортировки мягких вскрышных пород
	Платообразные	Отсыпка одноярусных отвалов при транспортных системах разработки залежей с крутым или наклонным падением
	Платообразные террасированные Система гребней	То же, при отсыпке многоярусных отвалов
	Одиночные гребни	То же, при отсыпке верхнего яруса отвалов драглайнами или консольными отвалообразователями
Насыпи, дамбы	Валы трапециевидного сечения	Отсыпка бортовых отвалов драглайнами при проведении траншей или разработке вытянутых маломощных залежей пологого падения поверхностного типа
		Строительство транспортных коммуникаций или гидротехнических сооружений

Денудационно-аккумулятивные

Внутренние отвалы	Платообразные	Отсыпка одноярусных отвалов при транспортных системах разработки горизонтальных или пологих залежей
	Платообразные террасированные	Отсыпка многоярусных отвалов при той же технологии

Типы нарушенных земель	Формы рельефа	Способы и условия создания форм рельефа
	Система гребней	Перевалка вскрыши экскаваторами, отвалообразователями или транспортноотвальными мостами. Отсыпка верхнего яруса отвалов консольными отвалообразователями при транспортных системах разработки

Аккумулятивные формы рельефа, обусловленные переработкой полезных ископаемых

Внешние отвалы	Плоские	Отвалообразование с применением гидротранспортировки золы тепловых электростанций, шламов или хвостов обогатительных фабрик
	Платообразные	Отсыпка одноярусных отвалов хвостов сухого обогащения полезных ископаемых и отходов металлургического передела руд с применением автомобильного или железнодорожного транспорта
	Платообразные террасированные	Отсыпка многоярусных отвалов при той же технологии
	Гребневидные	Отсыпка хвостов сухого обогащения полезных ископаемых с применением подвесной канатной дороги
	Конические (терриконы)	То же, с применением скипов или опрокидных вагонеток

Данные В. А. Овчинникова свидетельствуют о том, что особенности выработанных форм рельефа при карьерной добыче определяются условиями залегания залежи (рис. 12). В то же время форма аккумулятивных тел в известной мере зависит от технологии отсыпки пустой породы.

Дражные разработки представляют собой специфическую форму открытой добычи полезных ископаемых. Самые крупные модели драг рассчитаны на глубину черпания до 50 м и весят немногим более 20 тыс. т каждая. Производительность мощных драг составляет 8 млн. м³ горной массы в год.

Как указывают О. П. Доменик и соавторы, в комплекс горно-подготовительных работ при дражных разработках входят: очистка поверхности от растительности, предварительная

вскрыша непродуктивных отложений, разваловка отвалов и высокого надводного борта, оттаивание мерзлых и сохранение талых пород от зимнего промерзания, мероприятия по обеспечению водоснабжения драги и распределению потоков на подготавливаемых и обрабатываемых площадях. Переработка

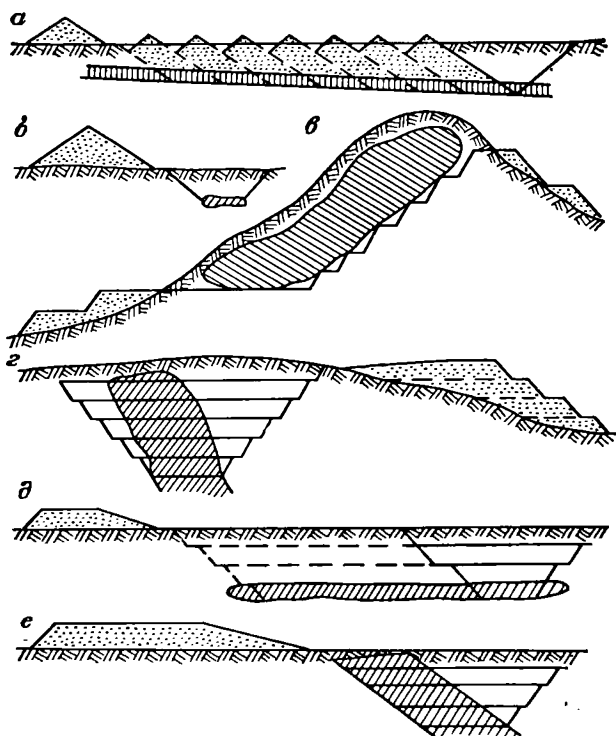


Рис. 12. Рельеф, образующийся при открытой разработке месторождений различного типа [24].

Поверхностные месторождения: а — пологие, площадки; б — пологие, вытянутые. Высотные месторождения: в — крутопадающие, наклонные. Глубинные месторождения: г — крутопадающие; д — пологие; е — наклонные

горной массы драгами включает подводное черпание, дезинтеграцию, грохочение, гравитационное осаждение полезного ископаемого в водном потоке и раздельное складирование пород различных классов крупности. В процессе добычи россыпного полезного ископаемого драгой создаются следующие формы рельефа: вскрышные отвалы пустой породы, карьеры добычи грунта, плотины, дамбы и собственно дражные элементы рельефа. Последние представляют собой чередование линейно вытянутых валов (гребней) и впадин (пазух). Валы слагаются промытыми грубообломочными фракциями, тогда как впадины

заполнены мелкоземом. Однако наиболее тонкий материал либо выносится вниз от места разработок речными водами, либо осаждается в специально создаваемых для очистки воды илоотстойниках.

Добыча россыпных полезных ископаемых другими методами по геологическим результатам во многом похожа на дражную.

Подземная добыча. Удельный вес добычи полезных ископаемых из подземных выработок в среднем по миру составляет 34 % [23]. Добыча осуществляется с применением разнообразных высокопроизводительных агрегатов. Широко внедряется камерно-столбовая система добычи руды цветных металлов вместо менее производительной системы ее слоевого обрушения. На богатых по содержанию металлов месторождениях и участках все шире практикуется разработка с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями, что обеспечивает наибольшую полноту выемки запасов и минимальное разубоживание руды.

Наряду с традиционной проходкой шахт начал применяться оригинальный метод спиральных выработок. В Швеции на одном из крупнейших в мире подземном руднике Кируна применен метод вскрытия железорудного месторождения спиральными транспортными выработками со съездами до основного рабочего горизонта 540 м. К 1978 г. был запроектирован ввод в строй новый транспортный горизонт 775 м [4]. Такой же прием осуществлен в Норвегии в районе г. Драмена. Здесь добыча строительного материала осуществлялась не карьерным, а подземным способом по спирали внутри платообразного массива. За 8 лет из винтообразной шахты-туннеля было добыто 200 тыс. м³ строительного материала. В результате шесть витков туннеля высотой 4—5 и шириной 9 м вышли на поверхность плато. Так была построена спиральная автодорога на его живописную вершину. Кроме того, в горе были созданы подсобные камеры, оборудованные под склады и гаражи, и шахта с лифтом, примыкающая к виткам автодороги. Во время строительства по ней спускался добытый строительный материал. Крепить туннель не потребовалось.

Расширение габаритов подземных горнодобывающих предприятий идет одновременно с их все большим углублением. На золотых рудниках ЮАР горнопроходческие работы опустились до глубин 3000—3900 м от поверхности. Температура горных пород здесь достигает 47—54 °С. Золоторудная жила месторождения Кола в Индии отработана до глубины 3231 м. Для работы людей на таких глубинах созданы сложные системы охлаждения и вентиляции, а также обеспечения безопасности работ [4].

При подземной добыче твердых полезных ископаемых перемещение горных масс человеком определяется: 1) размерами

подземных выработок; 2) количеством пустой породы и полезного ископаемого, поступающего на поверхность; 3) объемом выработанной пустой породы, оставляемой в подземном пространстве.

По форме и размерам подземные горные выработки существенно различаются. Имеются, как уже указывалось, спиралеобразные, стволово-камерные и обычные выработки, состоящие из шахтных стволов и отходящих от них штолен и др.

Поверхностные шахтные отвалы подразделяются В. А. Овчинниковым на четыре группы.

1. Платообразные одноярусные, создаваемые с применением автомобильного или железнодорожного транспорта.
2. Платообразные террасированные, многоярусные, формируемые с применением того же транспорта.
3. Гребневидные, насыпаемые с применением подвесной канатной дороги.
4. Конические (терриконы), образуемые с помощью скипов или опрокидных вагонеток.

В связи с тем что вред от породных отвалов, в особенности угольных шахт, становится все больше, закладка пустой породы в подземные выработки увеличивается. Согласно Е. А. Будзило, в ПНР и ФРГ пустая порода из большинства угольных шахт на поверхность не выдается, а закладывается в выработанное пространство. Кроме того, предпринимаются меры по ликвидации терриконов. В ФРГ ежегодно с поверхности в подземные выработки спускается 3—4, во Франции 6—7, в ПНР 4—5, в ЧССР около 2 млн. м³ породы.

Защита от затопления

Наибольшие трудности при горных разработках возникают из-за притока подземных вод. Известны лишь единичные случаи, когда карьерные выемки полностью ограждались водонепроницаемыми перемычками-завесами. Например, на месторождении серы Тарнобжек в Польше была создана кольцевая завеса из искусственного водонепроницаемого материала. Однако подавляющее большинство карьеров и все шахты защищаются от притока подземных вод путем их откачки. Самые значительные мероприятия такого рода, как пишет Б. С. Устюжанин, проводятся в бассейне р. Рейн (район г. Кельна). Здесь за последние 10 лет при отработке пластов бурого угля открытым способом откачивалось в среднем 1,2 км³ подземных вод в год при максимуме до 45 м³/с, вследствие чего их уровень снизился примерно на 300 м по сравнению с первоначальным.

В последнее время в СССР при добыче угля из карьеров и шахт ежегодно выдается на поверхность около 2,4 км³ шахтных, дренажных и шламовых вод [23].

Очень значительные работы по водопонижению проводятся при добыче рудных полезных ископаемых. Так, на Старооскольской группе месторождений железных руд КМА мощность дренажно-осушительных систем достигает 4 м³/с, а на Миргалимсайском месторождении полиметаллических руд более 3,5 м³/с.

В результате многолетней разработки месторождений железных руд КМА и интенсивной эксплуатации водозаборов в этом районе снижение уровня подземных вод в надюрском комплексе водоносных горизонтов колеблется от 8 до 20 м, в среднедевонском — от 40 до 50 м, в архей-протерозойском — от 70 (Михайловский карьер) до 100 м (Лебединская группа карьеров). Площадь, охваченная водопонижением в районе КМА, достигла 250 тыс. га.

При наличии депрессионных воронок изменение уровня подземных вод наблюдается вокруг них в пределах всех подразделений рельефа — днищ долин, склонов и водораздельных пространств.

Представление о том, в каком соотношении находятся различные составляющие водопитока подземных вод в районах водоразборных сооружений карьеров и шахт в некоторых районах СССР, дает табл. 28.

Данные табл. 28 свидетельствуют о том, что охрана действующих карьеров и шахт от затопления с помощью откачек приводит к значительному нарушению круговорота воды в таких районах.

Создание открытых разработок и водоотбор в области их влияния обуславливают проявление ряда процессов-следствий.

Непреднамеренное загрязнение воздуха

Введение горных работ как в карьерах, так и в шахтах вызывает загрязнение воздуха газами и твердыми частицами. Газы выбрасываются при взрывах и применении дизельной техники. В целом такое выделение газа имеет незначительные масштабы на фоне более мощных процессов естественного выделения метана и углекислого газа при формировании выработок.

Значительные проблемы создает загрязнение воздуха пылью, которая поступает из карьеров в результате взрывов, земляных и погрузочно-транспортных работ. Из шахт пыль выносятся с вентиляционными потоками. Кроме того, она также образуется при погрузочно-транспортных работах. Большое количество пыли продуцируется на обогатительных фабриках.

Оценка составляющих водопритока в районах водозаборных сооружений некоторых карьеров и шахт СССР
(в числителе — расход воды, л/с; в знаменателе — %) (по Б. С. Устюжанину)

Район	Способ	Реки, в бассейне которых образуются депрессии	Год	Элемент формирования водопритока			
				Фiltrация поверхност- ных вод	Уменьшение подземного притока в реки	Сработка взрывных за- пасов	Прочий приток
Староскольское железорудное месторождение	Карьеры, шахты	Осколец Оскол, Чуфичка	1966	925	716	291	274
				42	33	13	12
Североуральский бокситоносный район	Шахты	Сарайная, Вагран, Калья	1953	775	464	49	0
				60	36	4	0
Кинзловский каменноугольный бассейн	То же	Косьва	1964	300	266	24	0
				51	45	4	0
Богословское буругольное ме- сторождение	Карьеры	Лалча	1966—1970	140	160	0	0
				47	53	0	0
Миргалимсайское полиметалли- ческое месторождение	Шахты	Болядыр, Биресек, Кантаги и др.	1964	1920	1420	20	72
				56	41,3	0,6	2,1
Джезказганское месторождение цветных металлов	Карьеры, шахты	Келчир, Джезды	1964	50	60	90	25
				22	27	40	11

К таким процессам относятся различные виды массового перемещения горных пород.

Оползни — наиболее опасная и широко распространенная форма разрушения откосов выемок и уступов отвалов. В практике горных работ известны оползни объемом в сотни тысяч и десятки миллионов кубических метров. Иногда оползни перед отвалами перекрывали площади, в десятки раз превышающие занятые самими отвалами. Оползанию нередко предшествуют другие явления, например оплывание или пластическое течение подстилающих пород. Нередко оползание идет одновременно с оплыванием. В этом случае имеют место сложные оползни — оплывания, пластического течения и др.

По объему сползших масс различают оползни мелкие (сотни—тысячи кубических метров), средние (десятки тысяч кубических метров), крупные (сотни тысяч кубических метров) и очень крупные (миллионы кубических метров). Помимо оползней на участках выемки и отсыпки горных масс развивается ряд других процессов [27].

Обрушения и обвалы представляют собой быстрое смещение и падение блоков и пачек пород, оторвавшихся от уступов или бортов карьера. Обрушения нередко начинаются с оскользней по подрезанным откосами карьера поверхностям ослабления.

Осыпи происходят в форме смещения и падения мелких обломков и зерен пород, отделившихся в результате выветривания. Осыпание пород, вызванное или усиленное действием вибрации, называется осовами.

Опывины. В условиях значительного обводнения в бортах карьеров, сложенных фильтрационно неустойчивыми породами, наблюдается их оплывание. Оно особенно интенсивно в период вскрытия и в начале разработки месторождения, когда дренирующее действие карьера и водопонижающих устройств еще не проявилось в полной мере. Оплывание — одно из наиболее распространенных и важных видов фильтрационного разрушения откосов из несцементированных и обводненных пород.

Просадки выражаются в виде вертикального опускания прибортовых участков высокопористых рыхлых горных масс без образования сплошной поверхности скольжения.

Уплотнение (консолидация) пород бортовых массивов происходит за счет снятия эффекта гидростатического взвешивания и устранения действия фильтрационного давления при осушении обводненных месторождений полезных ископаемых. Уплотнение пород отвалов под действием их собствен-

ного веса сопровождается уменьшением их пористости и влажности.

Поведение пород, слагающих уступы, борта и отвалы на карьерах, зависит от географических, геологических, гидрогеологических, инженерно-геологических и горно-технологических условий.

В подземных выработках антропогенные процессы-следствия проявляются в виде обрушения кровли или стенок, осыпания и оползания материала последних, а также в форме деформаций вмещающих пород.

Деформации пород, залегающих над выработками, носят различный характер — от плавных, без нарушения сплошности пород, до их полной дезинтеграции. При глубине залегания разрабатываемых пластов меньше 30—40-кратной величины их мощности просадка налегающих пород осуществляется весьма интенсивно [23]. Классификация поверхностных провалов, возникающих в этом случае, приводится в табл. 29.

Оседание массивов горных пород с образованием мульды, разрывов и сбросов происходит, как уже указывалось, при избыточном расходовании подземных вод на орошение. Аналогичная картина имеет место при водопонижении в районах разработки месторождений твердых полезных ископаемых, а также на площадях, где внутрислоевое давление снижается из-за добычи нефти и газа.

Таблица 29

Формы провалов, возникающих в результате подземной разработки полезных ископаемых [24]

Форма провалов	Форма и положение залежей полезных ископаемых
Мульдообразные	Разработка пластовых залежей, средней (от 1,5 до 3 м) и большой (более 3 м) мощности горизонтального и волнистого залегания или пологого падения (до 27°). Мульда сдвижения горных пород находится в зоне прогибов
Мульдообразные террасированные	Разработка залежей пологого или наклонного (от 27 до 45°) падения. Мульда сдвижения горных пород находится в зоне прогибов или обрушения
Каньонообразные	Разработка пластовых залежей средней и большой мощности, крутого падения (более 45°), с обрушением вмещающих пород. Мульда сдвижения находится в зоне обрушения
Каньонообразные с останцами	То же, при разработке сближенных пластов с крепкими вмещающими метаморфическими породами, стойкими к выветриванию
Кольцевые	Разработка крутопадающих штокообразных залежей. Мульда сдвижения находится в зоне обрушения

Стихийное накопление культурного слоя на поверхности при добыче твердых полезных ископаемых идет очень интенсивно. Например, по данным Дж. Джонсона, в штате Иллинойс (США) вокруг заброшенных шахт обычно развит почти сплошной культурный слой, состоящий из пустой породы и имеющий мощность от 1 до 3 м.

Нарушение состояния поверхностных вод. Водостбор и связанное с ним понижение уровня подземных вод приводит к уменьшению подземного стока в реки и водоемы. При значительных водопонижениях в пределах депрессионных зон во всех поверхностных источниках истощаются запасы воды, снижается водность рек, падает уровень в озерах и водохранилищах, высыхают болота, исчезают родники, ручьи и мелкие реки.

Сброс откачиваемых и сточных вод приводит к значительному увеличению водности ручьев и речек. Сток малых и средних рек в межень благодаря этому местами возрастает в 1,5—3 и более раз.

В частности, в районе КМА, по данным В. И. Казьмина, за счет откачек подземных вод, особенно из недренлируемых водонесных горизонтов, резко увеличилась водность некоторых рек. Например, среднегодовой сток р. Оскольца увеличился на 21—108 %, р. Черни — на 20—30 %. И это произошло несмотря на то, что обе реки «подвешены» на значительных участках над депрессионными воронками уровня подземных вод и существенную долю своих вод (до 1/5) теряют в результате инфильтрации.

Искусственное увеличение расходов воды в некоторых реках приводит к повышению на отдельных участках уровней подземных вод, затоплению и подтоплению земель.

Загрязнение подземных и поверхностных вод. Сброс шахтных вод приводит к сильному загрязнению подземных и поверхностных вод. Исследования в Донбассе показали, что вместе с водами, извлеченными из шахт, в реки поступает значительное количество растворенных солей. Резко увеличивается и содержание взвешенных частиц. Поверхностные воды, загрязненные шахтными, причиняют определенный экологический и материальный ущерб.

По наблюдениям В. И. Казьмина в районе КМА, в естественных водах некоторых рек содержится 12—90 мг/л взвешенных частиц, а в шахтных водах — от 13 до 1030 мг/л. В сбрасываемых водах в повышенных концентрациях отмечены нефтепродукты и тяжелые металлы. Повышенное содержание взвешенных частиц, тяжелых металлов и нефтепродуктов отмечается также в реках Свапе и Осколе ниже впадения в них упомянутых выше рек.

Сильно загрязняются реки взвешенными наносами ниже дражных полигонов. Мутность дражных стоков обычно равняется 15—20 г/л.

Деградация многолетнемерзлых пород происходит при непрерывном тепловом воздействии на них в результате различных мероприятий. Создание наземных и подземных сооружений при добыче полезных ископаемых, их обогрев и вентиляция, а также откачка подземных вод — все это приводит к протаиванию пород. По наблюдениям Л. М. Демидюк в районах Крайнего Севера СССР, строительство рудников и сопутствующих им комплексов наземных и подземных сооружений вызвало изменение мерзлотно-геологических условий. В пределах поселков с отапливаемыми сооружениями под зданиями происходит оттаивание пород. Глубины оттаивания под зданием изменяются от 14 до 50 м в зависимости от габаритов здания и температуры внутри помещения.

Промышленное освоение месторождений подземным способом вызывает локальную деградацию многолетнемерзлых пород. Это обусловлено отепляющим действием вентиляции. По расчетам Л. М. Демидюк, за 10 лет эксплуатации размеры ареолов оттаивания вокруг стволов на одном из рудников северной части СССР составили от 8 до 20 м в зависимости от состава и свойств пород. С максимальной скоростью оттаивание происходило в первые годы работы рудника, а затем оно замедлилось. Деградация мерзлоты и отепление талых пород происходит в зоне водозабора. В ней за первые пять лет произошло не только оттаивание мерзлых пород, но и отепление массива, особенно значительное в интервале глубин от 0 до 15 м.

Природно-антропогенные процессы

Значительное изменение геолого-геоморфологических, гидрологических, гидрогеологических и метеорологических условий в районах добычи полезных ископаемых является причиной развития в их пределах сложного комплекса природно-антропогенных процессов. Последние осуществляются как на поверхности, так и в подземной обстановке.

Подземные процессы

Целый ряд субтерральных процессов осуществляется за счет реализации природных источников энергии, тогда как образование подземной выработки и деятельность в ней человека служат лишь своего рода спусковым крючком для них. Такими являются: 1) горные удары, если их энергия определяется не только весом вышележащих пород, но и тангенциальными напряжениями в земной коре; 2) внезапные выбросы пород, воды и газов; 3) прорывы вод и пльвунов; 4) суффозионное разру-

шение пород; 5) выщелачивание легкорастворимых пород; 6) пучение глинистых пород при их набухании; 7) подземные пожары и отвердение пород в местах их проявлений; 8) вспучивание кровли подземных выработок в мерзлых породах при заполнении их водой и ее замерзании.

Большинство из перечисленных процессов охарактеризованы Ф. В. Котловым [18]. Приводим сведения о них, заимствованные у этого автора (табл. 30).

Таблица 30

Характеристика некоторых подземных природно-антропогенных процессов [18]

Процесс	Краткая характеристика	Условия развития
Горное строение, удары	Мгновенная разгрузка энергии упругой деформации высокопрочных скальных пород в местах максимальных концентраций напряжений и их перераспределение в связи с проходкой	Высокая прочность и жесткость скальных пород, обладающих большими внутренними напряжениями. Наблюдаются на больших глубинах, обычно более 200 м
Внезапные выбросы	Внезапные выбросы угля и газа в выработки характерны для глубин более 100—250 м	Приурочены к тектоническим разрывам и нарушениям угольного пласта
Прорывы поверхностных, подземных вод и пльвуны	Возникают внезапно при вскрытии напорных водоносных горизонтов, пльвунных пород, при малой мощности волоупоров, наличии разломов, трещин, пустот и больших гидравлических градиентов. Исчезают реки, озера, пруды, затапливаются выработки, на поверхности земли образуются провалы	Прорыв вод и пльвунов через старые и новые трещины и пустоты, образующиеся при сдвижении пород в массиве; заброшенные шахты, шурфы, колодцы. Наличие напорных вод и пльвунных пород
Механическая и химическая суффозия	Размыв и растворение пород, вынос мелкодисперсных частиц и солей, суффозионное разуплотнение, декольматация и развитие наледи	Градиенты напора, вызывающие движение подземных вод, фильтрационный размыв и выщелачивание пород. Критические скорости. Напорная фильтрация подземных вод, водоотлив
Подземные пожары	Выгорание пластов каменного угля, горючих сланцев, торфа, сопровождаемое обрушением и сдвижением пород	Самовозгорание и загорание при производстве горных работ

Самовозгорание терриконов. К числу субтерральных, по-видимому, следует отнести также такую разновидность подземных пожаров, как самовозгорание терриконов.

О масштабах развития пожаров, связанных с породными отвалами угольных шахт, можно судить на примере Донбасса. Здесь, как указывает Е. А. Будзило, большинство таких отвалов являются горящими. Это ведет к значительному загрязнению воздуха. В Львовско-Волынском угольном бассейне с 1 м^2 горящих отвалов выделяется в сутки 10,8 кг окиси углерода, 6—5 кг сернистого газа, 0,6 кг сероводорода и окислов азота [23].

Изменение пород. Интенсивно идут подземные природно-антропогенные процессы в депрессионных зонах, образованных при откачках воды. Здесь скорость перемещения подземных вод возрастает, поэтому повсеместно наблюдается фильтрационная деформация некоторых типов пород, подземный размыв и вынос вещества, а нередко и процессы кольматации [27]. В то же время из-за уменьшения объема вне зон интенсивного движения подземных вод происходит уплотнение пород, увеличение их прочности, агрегирование тонких частиц.

Поверхностные процессы

В эту группу, помимо некоторых специфических, входят различные виды ускоренной переработки обнаженных поверхностей антропогенного рельефа выветриванием, смывом, воздушными потоками и др. Особо рассматриваются процессы в криолитозоне.

Выветривание и почвообразование. Породы, обнаженные при образовании выработок и сгруженные в отвалы, в поверхностном слое подвергаются интенсивному выветриванию. Ю. Д. Матвеев, проводивший натурные наблюдения за выветриванием неизмененных осадочных пород в свежих стенках карьеров, пришел к выводу, что этот процесс в умеренном поясе осуществляется с начальными скоростями порядка нескольких десятков сантиметров в год. Однако со временем по мере оформления профиля коры выветривания скорость разрушения пород постепенно снижается.

Поверхностное преобразование материала отвалов происходит по-разному в зависимости от их состава и гидротермических условий местонахождения.

Отвалы, на поверхности которых развиты фитотоксичные породы, могут в течение десятилетий служить ареной физического и химического выветривания. Однако оставаясь безжизненными и оголенными, они служат источником сноса вредных веществ.

Очень медленно преобразуется лишенный мелкозема галечник, который слагает отвалы, от промывки россыпных полез-

ных ископаемых. Наблюдения А. В. Накарякова и С. С. Трофимова на Среднем Урале показывают, что основные особенности почвообразования на галечниковых отвалах определяются главным образом количеством и свойствами остатков мелкозема.

При достижении 40—70-летнего возраста почвы на отвалах по контрастности, выраженности генетических горизонтов становятся близкими к зрелым почвам окружающих ландшафтов, но характеризуются карликовостью, сжатостью всего профиля. Мощность таких почв, формирующихся по буроземному типу почвообразования, не превышает десятка сантиметров.

В то же время при зарастании отвалов, сложенных рыхлыми дисперсными породами, на них быстро развивается почвенный профиль, лишь по некоторым признакам отличающийся от зонального.

Эоловый перенос и аккумуляция. В районах действия горнодобывающих предприятий весьма активно происходит разнос вещества по воздуху и его аккумуляция вблизи источников выноса.

Насыщение воздуха пылью происходит за счет развеивания открытых отвалов и других оголенных мест. Значительными ее источниками являются также вентиляционные потоки воздуха из шахт, буровзрывные работы в карьерах, погрузо-разгрузочные работы и движение тяжелых автомашин по грунтовым дорогам, некоторые виды переработки руды.

Основную причину очень сильного загрязнения воздуха и, как следствие этого, снега, поверхностных вод и почвы продуктами угледобычи на Крайнем Севере раскрыли Е. А. Ельчанов и А. И. Шор. Они пишут, что мерзлые угли более хрупки, а это вызывает повышенное пылеобразование при их отбойке. Из шахт, где добывается такой уголь, выносятся вентиляционными струями большое количество угольной пыли и еще больший унос пыли происходит при погрузке мерзлых углей в транспорт на поверхности. В результате территория вокруг шахты в радиусе 15—20 км засоряется угольной пылью.

Увеличение речного стока растворенных соединений. Вынос растворенных соединений водотоками, дренирующими районы открытых разработок полезных ископаемых, резко увеличивается в период эксплуатации месторождений и даже по окончании ее. К. Коллиер и соавторы провели изучение поверхностных и подземных вод района открытой угледобычи в бассейне руч. Бивер Крик штата Кентукки (США). Они указывают, что из-за разработок, которые здесь были начаты в 1955 г. и прекратились в 1959 г., резко возросла минерализация и кислотность поверхностных и подземных вод, что отрицательно сказалось на состоянии гидробионтов района. О масштабах изменения минерализации воды в реке, дрени-

рующей площадь, нарушенную открытыми разработками, дает представление табл. 31.

Таблица 31

Модули ионного стока и средние расходы воды в реках Кеин и Хелтон Бренч (по К. Коллиеру и др.)

Годы наблюдений	р. Кеин				р. Хелтон Бренч (контроль)			
	Расходы воды, м ³ /с	Модули ионного стока, т/км ² ·год			Расходы воды, м ³ /с	Модули ионного стока, т/км ² ·год		
		замеренные	привнос с осадками	химический вынос		замеренные	привнос с осадками	химический вынос
1957	16	79	12	67	16	16	11	5
1958	17	77	11	66	17	23	11	12
1959	8	66	8	58	8	9	8	1
1960	19	145	11	134	17	19	11	8
1961	14	77	9	68	13	15	8	7
1962	19	96	12	84	18	20	11	9

Данные табл. 31 показывают, что химический вынос с территории, нарушенной открытыми разработками угля, во много раз выше, чем с такой же местности без угледобычи.

Ускоренная эрозия. Плоскостному и ручейковому смыву подвергаются стенки выемок и склоны отвалов. Имеющиеся количественные оценки ускоренной эрозии на этих поверхностях рельефа свидетельствуют о ее большой интенсивности. Так, согласно Л. В. Моториной с соавторами, на Кимовском и Ушаковском углеразрезах Тульской области модуль смыва с отвалов колеблется от 1384 до 7959 м³/га·год, а средний показатель за 10—15 лет составляет 2000—2500 м³/га·год. Происходящий при этом вынос ионов Н⁺, Al³⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, SO₄²⁻ оказывает отрицательное воздействие на почву и урожайность на примыкающих к отвалам пахотных угодьях. Разнос продуктов смыва значителен. Величина затеков составляет на Ушаковском разрезе от 6,4 до 14,4, а на Кимовском — от 8,4 до 31,2 % от всей площади отвалов.

Детальное изучение ускоренной эрозии склонов отвалов провел Х. Хмаль в Верхне-Силезском угольном бассейне (Польша). Отвалы сложены грубообломочными породами с преобладанием щебня и дресвы. На 10 репрезентативных участках выявлены два типа эрозионных форм — промоины, прорезающие склоны отвалов на всем протяжении, и рытвины, приуроченные к бровкам склонов. Рост промоины приводит к параллельному отступлению склонов со скоростью 1,73 см/год, а рытвины выколачивают прирвочные части склонов со ско-

ростью 0,5—0,9 см/год. При затухании эрозии смыв происходит преимущественно в средней части склонов (0,4—0,7 см/год). Х. Хмаль рекомендует для предупреждения эрозии придавать склонам отвалов выпуклую форму без выраженной бровки.

Дж. Гиллэ и соавторы провели экспериментальное изучение ускоренной эрозии на отвалах карьеров на западе Северной Дакоты (США). Отвалы образованы суглинистыми породами вскрыши. Производилось искусственное дождевание — в течение двух часов отвалы подвергали воздействию 64 мм осадков, а в случае исследования почвозащитной роли соломы в дозе 4,5 т/га осуществлялось дополнительное получасовое дождевание той же интенсивности. Исследования велись на стоковых площадках размером 4×22 м с уклонами от 2°30' до 10°. На вскрышных породах, покрытых гумусированным слоем, смыв доходил до 74 т/га, тогда как на породах без покрытия его значение было 18 т/га. Смыв с участка ненарушенного пастбища при тех же условиях опыта составил всего 0,2 т/га. Таким образом, при образовании отвалов эрозия усиливалась в 90—370 раз. Соломенная мульча снижала смыв на 84 % на участках с нанесенным гумусированным слоем и на 93 % на участках без этого слоя. На основании проведенного эксперимента авторы установили масштабы усиления эрозии на площадях, занятых отвалами, и сделали заключение о необходимости противозерозионной защиты их при рекультивации.

Ускоренная аккумуляция вещества в районах добычи полезных ископаемых связана как с процессами размыва, так и с высокой мутностью технологических вод, сбрасываемых в водотоки. Осадконакопление идет как в искусственных стоячих водоемах на дне брошенных карьеров, так и в русле и на пойме рек. Кроме того, продукты смыва с отвалов в виде шлейфа распространяются на прилегающие к ним земли.

В искусственных водоемах дно карьеров аккумуляция идет очень быстро. По наблюдениям К. Коллиера и соавторов на открытых разработках в бассейне руч. Бивер Крик в штате Кентукки (США), мощность донных осадков в таких водоемах варьировала от десятков сантиметров до 1 м. Седиментация осуществлялась в течение 4—6 лет.

По данным В. И. Казьмина, на плесовых участках рек Черни и Осколец (район КМА) толщина слоя ила ниже сбросов шахтных вод достигает 0,4—0,6 м.

О масштабах ускоренной аккумуляции на дне долин можно судить по такому примеру. Между 1849 и 1914 гг. на западном склоне р. Сьерра Невада велась интенсивная гидравлическая разработка россыпей, в результате чего в р. Сакраменто и ее притоки было сброшено более 1,13 км³ наносов. Это вызвало ускоренную аккумуляцию на днищах долин, включая низовья р. Сакраменто. Пострадал и залив Сан-Франциско, площадь

которого за 120 лет сократилась с 1233 до 1096 км², т. е. на 11 %. Правда, как указывает Р. Пестронг, в заполнении мелководий залива наносами виноваты не только добыча золота в его бассейне, но и бесконтрольная распашка земель. Оба мероприятия были причинами поступления в залив примерно одинакового количества наносов, в сумме составившего приблизительно 1,7 км³.

Образование провалов. Активизация процессов выщелачивания и снятие сил гидростатического взвешивания в зонах депрессионных воронок иногда приводит к формированию провалов. Так, на окраине г. Кентау в предгорьях Каратау в 1978 г. произошел карстовый провал в девонских известняках. Он сопровождался сотрясением земли, гулом и образованием грибовидного столба пыли. Площадь устья провала составила 1200 м² и видимая глубина достигла 50—55 м. Для засыпки провала потребовалось около 30 тыс. м³ пустой породы.

Описанное явление, как пишет М. Т. Адиков, было вызвано нарушением естественного режима гидрогеологических и инженерно-геологических условий вследствие многолетней откачки воды из действующего рудника полиметаллического комбината и понижения уровня подземных вод на глубину 200 м. Вокруг месторождения с охватом всей территории города образовалась огромная депрессионная воронка площадью 1000 км².

По-видимому, аналогичные явления неоднократно имели место в районе г. Иоганнесбурга (ЮАР), где ведется подземная добыча рудного золота. Здесь в результате понижения уровня подземных вод в мощной (до 1000 м) доломитово-известняковой свите трансвааль неоднократно возникали провалы — большие воронки диаметром свыше 50 м и глубиной более 30 м и ряд более мелких. В декабре 1962 г. внезапно возник крупный провал под заводом, располагавшемся вблизи ствола одной из шахт. Завод полностью был поглощен провалом, при этом погибло 29 человек. В августе 1964 г. при сходных обстоятельствах провал поглотил дом вместе с пятью жильцами.

Термические оползни-обрушения и выбросы породы. Такие процессы имеют место на горящих и интенсивно горящих отвалах. Выбросы возникают под действием пара, образующегося в теле отвала (пустотах, трещинах) при попадании туда воды [27]. Все эти процессы вызывают загрязнение воздуха.

Процессы в криолитозоне. В области развития многолетнемерзлых пород воздействие человека на земную кору при добыче полезных ископаемых приводит к очень серьезному нарушению функционирования ПЭК. Относительная сбалансированность в действии природных экзодинамических процессов в таких районах зиждется на весьма хрупкой основе, заключающейся в примерном постоянстве мерзлотных условий

природных грунтов. В поддержании этого постоянства очень велика роль растительного покрова и подстилки, аккумуляция которой происходит длительное время.

Добыча полезных ископаемых радикально нарушает мерзлотные условия в местах создания выработок и отвалов. В пределах криолитозоны отвалы, отсыпанные вне днищ речных долин, промерзают даже там, где их подошвой служат талые грунты.

Изменение температурного режима при создании карьера зависит, как указывает Л. М. Демидюк, от его величины и формы, а также от состава и свойств вскрываемых пород. В частности, открытым выемкам в галечниках свойственно увеличение температур внутри них на 2—2,5 °С.

Специфические изменения претерпевают отвалы, возникающие при снятии лёссово-ледовой покровной толщи, широко распространенной в перигляциальной области криолитозоны. Такие отвалы, как пишут Е. А. Ельчанов и А. И. Шор, протаивают и превращаются в пульпу, которая растекается по долинам ручьев, заполняя небольшие озерные котловины.

По данным этих же авторов, сброс больших объемов воды при откачках, производимых при добыче полезных ископаемых из подмерзлотных горизонтов, при низких температурах приводит к образованию наледей значительной мощности. Последние разрушают дороги, выводят из строя поверхностные сооружения. Кроме того, они способствуют развитию таликов, которые становятся каналами питания подземных вод. В результате всего этого усиливается образование термокарстовых озер.

Сброс шахтных вод в летнее время вызывает загрязнение рек, усиление эрозии и аккумуляции. Кроме того, мощные наледи становятся плотинами в долинах рек, вызывая затопление, заболачивание и образование небольших озер.

Образующиеся при подземных разработках прогибы и провалы способствуют развитию озер и заболоченности территории, образованию таликов и поступлению поверхностных вод в подземные водоносные горизонты с последующим их загрязнением.

Очень существенное изменение мерзлотных условий вызывает загрязнение снега угольной пылью. В этом случае таяние снежного покрова происходит раньше обычного, а глубина протаивания грунтов увеличивается в 2,5—3 раза по сравнению с нормой. Все это вызывает образование озер и повышенную заболоченность территории. Из-за выноса пыли вода в озерах в весенний период содержит до 30—60 г/л взвешенных частиц и совершенно непригодна для водоснабжения населения. Загрязнение поверхностных вод приводит к разрушению зооценоза на площади, значительно превышающей размеры зоны

эолового рассеивания угольной пыли. Такое нарушение природного круговорота вещества в конце концов может привести к очень сильной деградации ландшафта.

Мероприятия, связанные с добычей полезных ископаемых, ведут к активизации склоновых процессов. Б. А. Оловиным проанализировано влияние подрезки склонов долин, образованных льдистыми отложениями, при разработке россыпных месторождений. При такого рода работах объем отвалов оказывается меньше объема вынудой породы из-за сброса мелкозернистого материала в водотоки. В результате на месте работок понижается базис денудации склонов, а интенсивность склоновых процессов соответственно возрастает. На участке склона протяженностью в десятки или даже сотни метров существенная подрезка его основания вызывает разрыв мохово-дернового покрова и небольшие термокарстовые просадки. В месте перехода вскрытой части склона в закрытую мохово-дерновым покровом происходит сползание образующейся при избыточном протаивании пульпы со скоростью 10—20 м в год.

Активизация солифлюкции и оползневой деятельности вызывается и отводом подземных вод при их откачках в овраги и речные долины.

Сбросы шахтных и сточных бытовых вод приводят также к овражной эрозии, темпы которой зависят от многих факторов, но обычно высоки и колеблются от нескольких до 10—20 м в год.

Добыча нефти и газа через скважины

Антропогенные процессы-мероприятия

В 1978 г. всего в мире было добыто 2904 млн. т нефти, включая газовый конденсат, и 1453 млрд. м³ природного газа. В настоящее время из месторождений морского дна извлекается около 25 % валовой добычи нефти и 10 % добычи газа. Таким образом, большая часть нефти и основная масса природного газа изымается из земной коры континентов.

Глубина эксплуатационных нефтяных скважин на суше достигла 7620 м и более. В СССР свыше 50 % нефти сейчас добывают путем применения вторичных методов на пласт и призабойную зону скважин, повышающих коэффициент нефтеотдачи. В крупных размерах проводится воздействие на пласт, в частности законтурное и внутриконтурное заводнения, которыми охвачено большинство разрабатываемых месторождений. Среди методов заводнения наиболее широко применяется высокоэффективный метод поперечного разрезания залежей рядами нагнетательных скважин [4]. Законтурное заводнение

применяется также при добыче газа. Масштабы закачки воды в земную кору только для этих целей во всем мире, по-видимому, очень велики. Об этом свидетельствует тот факт, что в СССР за 1971—1975 гг. должно быть закачено в пласты свыше 3,5 млрд. м³ воды.

Главными мероприятиями при добыче газообразных и жидких полезных ископаемых на суше являются: 1) бурение скважин, 2) улавливание поступающих через них флюидов, 3) различные приемы активизации процессов их поступления на поверхность.

Антропогенные и природно-антропогенные процессы-следствия

Разделение процессов, вызываемых добычей нефти и газа через скважины, на антропогенные и природно-антропогенные является не столь очевидным, как в некоторых других случаях. Когда флюид выбрасывается из скважины самопроизвольно, то такое получение полезного ископаемого можно считать контролируемым природно-антропогенным процессом, так как оно в основном обеспечивается природным внутрислоевым давлением. Сила выброса нефтегазового или газового фонтана не всегда сразу подчиняется человеку. Особенно нелегко покорить мощный горящий фонтан.

В то же время, учитывая, что большая часть нефти и определенная доля природного газа сейчас добываются с помощью различных воздействий на пласт, многие процессы-следствия, связанные с их извлечением, можно с известной долей условности считать антропогенными.

Сведения об процессах-следствиях, связанных с нефте- и газодобычей, приводятся в работе Ф. В. Котлова [18]. В земной коре имеют место следующие изменения: 1) падение внутрислоевых напоров, изменение напряженного состояния пород в массиве; 2) трансформация гидрогеологических условий (замещение выкачиваемой нефти водой, усиление водообмена, образование новых водоносных горизонтов, смешение вод), изменение уровней, уклона, скорости движения, химического, газового состава и температуры подземных вод; 3) вторичное изменение режима подземных вод, а также фильтрационные деформации пород вплоть до гидравлического разрыва водонепроницаемых слоев в связи с законтурным и внутриконтурным заводнением нефтяных месторождений и применением других способов мелноработки; 4) механическая суффозия и связанные с ней просадки пород и провалы нефтяных вышек, формирование суффозионных воронок диаметром 10—400 м и куполов выпирания в местах прорыва газов; 5) антропогенные «гейзеры» — выбросы газа, воды и твердых частиц в воз-

дух; 6) дегазация пород; 7) поступление в атмосферу полутных газов.

Ф. В. Котлов включает также в этот список нефтяные пожары, длящиеся иногда годами. Вероятно, этот процесс можно считать природно-антропогенным.

Особо надо упомянуть об оседании земной поверхности в районах нефте- и газодобычи. Об образовании мульд оседания, часто осложненных разрывами и сбросами, писали Ф. В. Котлов, Э. А. Новиков, М. Л. Успенский. Опускания охватывают площади в десятки и даже сотни тысяч гектаров, а по вертикали достигают 10 м. В США оседание поверхности имело место в районах Лонг-Бич (Калифорния), Саур-Лейк, Хьюстона, Бейтауна и Беллэра (Техас). В СССР опускания поверхности зафиксированы на Апшеронском полуострове.

Оседание поверхности происходит в настоящее время в районах нефте- и газодобычи Западно-Сибирской низменности. Благодаря закачкам в пласты огромных количеств воды (предусмотрено закачивать их в 1,8 раза больше объема извлекаемой нефти), масштабы опусканий здесь несколько уменьшаются. Однако, как указывают Е. М. Сергеев и соавторы, уже сейчас ясно, что величины оседания поверхности в этом регионе составят несколько метров.

В условиях неглубокого залегания уровня грунтовых вод (0,5—2 м) локальное понижение земной поверхности, как отмечается в их же работе, вызывает повышение зеркала грунтовых вод и увеличение заболоченности и заозерности.

Природно-антропогенными процессами являются загрязнение нефтью и нефтепродуктами почвы, а также поверхностных и подземных вод. Например, в условиях Среднего Приобья, как пишет Б. Ф. Рябков, при весеннем таянии снегов, обильных дождях и затоплении паводками кустовых площадок, приуроченных к пойме, иногда разрушаются шламовые амбары и остатки буровых растворов, и нефтепродукты растекаются. При этом загрязняется почва, стоячие водоемы и реки.

Меры по снижению эффекта негативных последствий

Усиление мер, препятствующих чрезмерному ухудшению качества окружающей среды в районах добычи полезных ископаемых, осуществляется одновременно с ростом извлечения полезных ископаемых. Защитные меры представляют собой широкий комплекс действий. Предусматривается охрана воздуха, поверхностных и подземных вод, биоты и почвенного покрова. Все это достигается в основном тогда, когда экологические мероприятия проводятся в соответствии с хорошо разра-

ботанной программой и опираются на использование передовой технологии. Перечень мероприятий по снижению эффекта негативных последствий в районах добычи твердых полезных ископаемых приводится в книге В. Н. Мосинца и М. В. Грязнова [23].

В дополнение к информации, содержащейся в их книге, необходимо кратко охарактеризовать мероприятия по охране поверхностных вод при дражных разработках россыпей. Б. А. Мальцев и соавторы пишут, что при отработке долинной россыпи насыщенные наносами воды сбрасываются в специально сооруженное водохранилище-отстойник площадью до 1,5 км². В результате загрязненность сточных вод снижалась в десятки раз.

При отработке террасовой россыпи пойменно-русовая часть реки отделяется от дражного разреза ограждающей дамбой, что значительно уменьшает количество взвесей в сливных водах.

Однако самыми эффективными являются условия, когда драга работает в «глухом» забое. Очистка воды в дражном разрезе производится путем разового обмена всего ее объема на подготовленную (очищенную с помощью коагулянта) воду. Последняя находится за перемычкой впереди драги в водоеме с уровнем воды на 30—50 см выше, чем в дражном разрезе.

Большой ущерб окружающей среде наносится при загрязнении нефтью. Согласно Б. Ф. Рябкову, для защиты природы в районах добычи нефти Западной Сибири необходимо: 1) обеспечение строительства и своевременного пуска в эксплуатацию очистных сооружений; 2) захоронение или утилизация остатков отработанных буровых растворов и ликвидация шламовых амбаров; 3) обеспечение и внедрение ингибиторов коррозии для предотвращения прорывов трубопроводов; 4) обеспечение специальной техникой, оборудованием, средствами по локализации и сбору разлитой нефти.

Разработка мер, противодействующих ухудшению состояния окружающей среды в районах, где ведется добыча полезных ископаемых, представляет собой комплексную многоотраслевую проблему. Ее успешное всестороннее решение необходимо в самом ближайшем будущем.

Добыча полезных ископаемых затрагивает гораздо меньшие площади, чем земледелие, пастьба или лесоразработки. Однако вынос вещества с горно-промышленных территорий обычно очень велик, а объемы нарушенных и перемещенных горных масс могут быть колоссальными. Такая антропогенная активизация экзодинамики земной коры в районах месторождений, многие типы которых представляют собой геохимические аномалии, приводит к значительному загрязнению окружающей среды.

«Шрамы», оставляемые на земной поверхности горнодобывающей промышленностью, полностью не могут быть ликвидированы, хотя бы потому, что немалая доля извлеченного из недр вещества идет на создание городов и поселков, коммуникаций, транспорта и др. Другая часть расходуется на топливо. Долгое время большинство нарушенных земель просто забрасывалось. Однако сейчас, когда население Земли превысило 4 млрд. человек, такому расточительному использованию земельных ресурсов приходит конец. Ныне в развитых странах широкий размах приобрели работы по преобразованию бесплодных нарушенных земель в пригодные для различного использования. При этом улучшаются не только земли, нарушенные горными разработками, но и антропогенные бедленды иного происхождения. Такие мероприятия именуются «рекультивацией земель», под которой понимается комплекс различных работ (инженерных, горнотехнических, мелиоративных, сельскохозяйственных, лесохозяйственных и др.), выполняемых за определенный промежуток времени и направленных на восстановление продуктивности нарушенных промышленностью территорий и возвращение их в различные виды использования [24]. Хотя термин «рекультивация земель» имеет широкий смысл, ниже будут приведены лишь данные, касающиеся этого комплекса работ в пределах территорий, нарушенных горнодобывающей промышленностью.

Суждение о масштабах ущерба, наносимого земельным ресурсам при добыче полезных ископаемых, можно составить лишь по сведениям, которые относятся к ряду развитых стран.

В США заброшенные карьеры занимают около 3,2—3,6 млн. га, а действующие около 0,4 млн. га. Ежедневно, как указывает М. Вэлдроп, открытыми разработками занимается 400 га. Однако в настоящее время федеральным законом запрещена традиция «выработал—бросил».

В СССР, по данным Т. П. Федосеевой, нарушено горными разработками 1881,5 тыс. га, из которых 154,6 тыс. га находится в горных областях. Распределение равнинных нарушенных земель по зонам следующее: полярно-тундровая — 86,5, лесотундровая — 51,5, северо-таежная — 125,4, южно-таежная — 962,3, лесостепная — 281,2, степная — 136,2, сухостепная — 35,8, полупустынная — 10,5, предгорно-пустынная — 8,9, субтропическая предгорно-полупустынная — 28,6, горные области — 154,6 тыс. га. Больше всего земель было выведено из хозяйственного использования при добыче торфа — свыше 900 тыс. га, при добыче цветных металлов — около 500, сырья строительных материалов — 280, угля — 80, руд черных металлов — около 50, горно-химического сырья — 40 тыс. га. Эти площади не включают просядок и провалов подземных выработок, зна-

чительной части отвалов с отходами переработки минерального сырья, а также земель, нарушенных при добыче нефти и газа и строительстве магистральных трубопроводов.

Земли, нарушенные горными разработками, во многих случаях являются источниками загрязняющих веществ, которые разносятся по воздуху, с поверхностными и подземными водами на прилежащие и более отдаленные территории. Рекультивация таких земель особенно актуальна.

В настоящее время, по данным статистического учета, в СССР восстановлено 500 тыс. га нарушенных земель, которые либо были под горными разработками, либо находились в зонах магистральных трубопроводов.

Рекультивационные работы принято делить на два этапа: первый — горнотехнический и второй — биологический.

Горнотехнические мероприятия по существу так меняют геолого-геоморфологическое строение нарушенной местности, что в итоге создается специфический запланированный рельеф с искусственным чехлом поверхностных отложений — прерывистым или сплошным в зависимости от будущего вида использования территории. Как указывают Т. Б. Кириллова и В. А. Овчинников, нарушенные земли после рекультивации могут быть использованы: 1) в качестве сельскохозяйственных угодий; 2) для создания лесов различного назначения; 3) для образования водохозяйственных объектов; 4) под строительные площадки; 5) под рекреационные комплексы. Правда, этот перечень не относится к глубоким карьерам. Их после выемки полезного ископаемого, как правило, превращают в водоемы.

Большой вред окружающей среде наносят терриконы угольных шахт. Во многих странах сейчас проводятся мероприятия по сокращению занимаемой ими площади. В то же время в ФРГ, например, пустая порода из угольных шахт идет на создание крупных искусственных холмов с лесопосадками. Как указывают Л. В. Моторина и В. А. Овчинников, многоярусные отвалы высотой до 60 м обслуживают в Рурском каменноугольном бассейне сразу несколько шахт. Порода от шахт в отвал транспортируется автосамосвалами. Применяемый порядок формирования отвалов от периферии к центру позволяет с начальной стадии отсыпки отвалов производить их рекультивацию.

По всему периметру площади, отведенной под отвалы, сооружается первичная насыпь высотой 8—10 м, равная высоте яруса отвала. Внешний откос насыпи является одновременно и окончательным откосом будущего отвала. Затем с насыпи производится отвалообразование к центру. После заполнения шахтной породой всей отведенной площади на высоту 8—10 м сооружают такую же насыпь второго яруса и так всего 4—6 насыпей, разделенных между собою террасами. Террасы

имеют уклон от бровки к уступам ограничивающих их более высоких отвалов. Это позволяет легко осуществить улавливание метеорных вод, выпадающих на отвалы. Затем производится биологическая рекультивация отвалов и выращивание на них древесных пород смешанного состава.

При проведении горнотехнических мероприятий нередко оказывается возможным создание такого искусственного почвенного покрова, потенциальная продуктивность которого превышает продуктивность уничтоженной природной почвы. Такие возможности открылись после того, как выяснилось, что создание культурной с определенными заданными качествами почвы позволяет получать максимальные урожаи, превышающие получение сельскохозяйственной продукции с любой природной почвы.

В силу экономических соображений создание искусственных почв на рекультивируемых землях не всегда целесообразно. Поэтому нередко горнотехнические мероприятия могут быть сведены лишь к определенной планировке местности, тогда как основной упор на возвращение нарушенных земель в состав продуктивных делается на биологические мероприятия. В этом случае рекультивируемая местность чаще всего отводится под посадки самых стойких и неприхотливых культур, произрастание которых в ограниченные сроки привело бы к формированию почвы.

В связи с постоянно идущим повышением цен на землю актуальность рекультивации заброшенных и вновь нарушаемых земельных площадей сейчас ни у кого не вызывает сомнений. Поэтому при проведении горных работ, линейного строительства и других мероприятий, резко ухудшающих состояние геологической среды, сейчас заранее планируется и комплекс рекультивационных преобразований. При этом уже при планировании производства основного вида работ, например добычи полезных ископаемых, предусматривается создание оптимальных для рекультивации условий. Такое опережающее планирование рекультивации имеет большое будущее и открывает широкие перспективы перед отраслями науки и техники, связанными с проблемами рационального использования природы.

УРБАНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ И ИХ СЛЕДСТВИЯ

Городские территории

Изучение экодинамических процессов городских территорий — сложная многоаспектная проблема. Наиболее всестороннее освещение она получила в монографиях Ф. В. Котлова и Р. Леггета. Кроме того, ей посвящены отдельные статьи советских и зарубежных авторов.

Суммарная площадь, занимаемая городами, относительно невелика. В конце 60-х годов она приблизительно равнялась 40 млн. га, а к 2000 г. по некоторым прогнозным оценкам урбанизированные территории могут расшириться до 100 млн. га. В 1978 г. площадь городских земель в СССР составляла 10 млн. га. В США под городской застройкой в 1974 г. находилось приблизительно 1,5 % территории, т. е. почти 14 млн. га.

Рельеф городов как никакой другой не похож на природный. На фоне искусственно выровненной незастроенной поверхности возвышаются различные по очертаниям и форме урбаноконструкции. Мелкая гидросеть в городах заключена в трубы. Берега крупных рек и других акваторий обычно укреплены. В горах различные элементы городской застройки приспособляются к природному рельефу местности благодаря террасированию последнего.

Урбанизированные территории представляют собой комплекс инженерных объектов, озелененных площадей, оголенных земель, мест с различного рода материалами и отбросами. Ф. В. Котлов [17] в структуре современного города выделяет следующие зоны: 1) промышленную, 2) селитебную, 3) коммунально-складскую, 4) внешнего транспорта и 5) прочих земель. Материальными элементами города являются: промышленные предприятия, жилая и общественная застройка, улицы, площади, наземный городской транспорт, мосты, виадуки, акведуки, метрополитен, подземные переходы, коммунально-бытовые предприятия, стадионы, бассейны, подземные коммуникации, подземные горнодобывающие предприятия, открытые разработки, железнодорожные станции, морские и речные порты, пристани, аэропорты, набережные, плотины, гидростанции, водохранилища, шлюзы, каналы, пруды, склады, зеленые насаждения, подсобные хозяйства, поля орошения, питомники, подземные хранилища, телерадиомачты и многое другое. Между перечисленными объектами существуют определенные взаимосвязи, а сами они упорядочены внутри различных функциональных зон города.

К 1964 г. масса зданий и сооружений в городах мира была 22,4 млрд. т [40]. На каждого горожанина приходилось, таким образом, около 22 т. С учетом материалов, входящих в состав покрытий площадей и улиц, а также транспорта, эта цифра может быть несколько увеличена. Следует учесть, что масса городов накапливалась длительно и даже в настоящее время ее прирост вряд ли превышает 2 млрд. т·год, т. е. немного меньше 1 т/чел·год.

В города поступают большие количества сырья и полуфабрикатов, которые превращаются в промышленную продукцию, потребляемую в местах производства и за их пределами. Вместе с тем города непрерывно поглощают грузопотоки продовольствия и промтоваров для внутреннего потребления. Необходи-

мым условием функционирования городов является их снабжение большими количествами воды и энергии.

На одного городского жителя расходуется, по данным М. И. Львовича, около 55 м³/год воды. Примерно 80 % этого количества сбрасывается в виде загрязненной воды в реки и другие водоемы, а 20 % в процессе использования уходит непосредственно в атмосферу и в земную кору, либо включается в состав продукции и твердых отходов.

В городах потребляется огромное количество топлива. Это означает, что горючие вещества, изъятые из недр Земли и с ее поверхности, в своей основной массе в трансформированном виде переводятся в атмосферу. В результате использования различных источников энергии (преимущественно ископаемого топлива) в ряде агломераций количество производимой человеком энергии приблизилось и в отдельных случаях даже сравнялось или превысило величину ее притока от Солнца (табл. 32).

Таблица 32

Потребление энергии в крупных промышленных центрах [19]

Район	Площадь, км ²	Среднее потребление энергии, 10 ³ эрг/с·см ²	Средняя величина прихода солнечной радиации, 10 ³ эрг/с·см ²
Земля Северный Рейн-Вестфалия (ФРГ)	34 039	4,2	50,4
в том числе:			
Рурская индустриальная область	10 296	10,3	50,4
Западный Берлин	234	21,5	57,5
Цинциннати (США)	200	26,2	99,96
Лос-Анджелес (США)	3 500	21,2	108,8
Нью-Йорк, район Манхэттена (США)	59	630	93,7
Фэрбенкс (Аляска, США)	37	18,6	18,1

Велико количество твердых отходов, образующихся в городах. В США, например, норма бытовых твердых отходов на 1 человека равняется 1—2 т/год. Количество промышленных отходов превышает массу бытовых обычно в 2—3 раза.

В настоящее время отходы все шире используются в качестве вторичного сырья и источника энергии, а также материала для улучшения рельефа городов и даже увеличения их площади за счет акваторий. В слабо развитых странах значительная доля отходов просто накапливается на улицах. И все же большая часть твердых отходов, почти все коммунально-бытовые и промышленные стоки сбрасываются за пределы городов, хотя сточные воды во многих случаях подвергаются определенной

очистке, нередко позволяющей осуществлять повторное использование воды.

Таким образом, города являются самыми крупными антропогенными концентраторами вещества и энергии и одновременно самыми мощными источниками их выброса и рассеивания.

Антропогенные процессы

Основными мероприятиями в городах, от которых зависит характер экодинамических процессов-следствий, являются: 1) строительно-ремонтные, 2) транспортные, 3) промышленное производство, 4) коммунально-бытовые, 5) выработка тепловой и электрической энергии. Осуществление этих мероприятий идет, как указывалось, за счет поглощения городами огромных количеств вещества и энергии на единицу площади. Часть вещества и какая-то очень незначительная доля энергии аккумулируется в составе нарастающих и вновь создаваемых объектов города. Однако в основном они рассеиваются.

Антропогенные потоки вещества и энергии в пределах города видоизменяют атмосферу, гидросферу и земную кору в их пределах.

Изменение атмосферы

Над городами происходит существенная контаминация воздуха загрязняющими веществами. Это обусловлено огромными масштабами продуцирования и выброса антропогенных аэрозолей, кроме которых в атмосферу поступают углекислый газ и пары воды. Твердые, жидкие и газообразные аэрозоли выбрасываются предприятиями, образуются от сжигания топлива в стационарных установках и в двигателях транспорта и, кроме того, механически «вырабатываются» при его движении. К этим источникам в последнее время добавились мусоросжигательные установки и станции.

Промышленные выбросы, в том числе от сжигания топлива, по оценке Д. Мюллера, превышают транспортные. Как указывает В. А. Покровский, большую роль в загрязнении атмосферы играют мощные тепловые электростанции, работающие на пылевидном низкосортном топливе. Универсальными загрязнителями атмосферного воздуха населенных мест являются домовые топки.

При сжигании углей (зольность каменного угля в среднем составляет 15, бурового 25 %) вынос золы в воздух может достигать 80—90 % от ее общего количества. В составе летучей золы преобладают кремний, кальций, магний, алюминий, а содержатся в ней почти все элементы, за исключением благородных газов. Среди загрязняющих газообразных веществ, обра-

зующихся при сжигании топлива, больше всего выделяется угарного газа, соединений серы и азота. В выхлопных газах автомобилей, кроме того, присутствует большое количество углеводородов.

В настоящее время применяются различные меры по улавливанию загрязняющих веществ, продуцируемых промышленностью и транспортом. По данным Т. И. Белокоской, степень улавливания твердых частиц зола на ТЭС в Англии составляет 98,3—98,7 %, во Франции — более 99 %, в Бельгии — 98—99 %, в США — 99 %, в Италии — 95—98 %. Для уменьшения насыщения городской атмосферы загрязняющими веществами и в первую очередь соединениями серы, азота и угарным газом сооружаются дымовые трубы высотой 200—300 и даже 400 м. Однако рассеивание загрязняющих веществ на обширные регионы становится все более сильной угрозой целостности их экосистем из-за выпадения «кислых дождей».

Явно недостаточными остаются меры по борьбе с загрязняющим воздействием автотранспорта на городской воздух.

Транспортная оснащенность человечества быстро возрастает. По данным ЮНЕП, одних только легковых автомобилей в 1978 г. находилось в эксплуатации 302 млн. и ежедневно добавлялось по 100 тыс. На участке автострады длиной 100 км и шириной 10 м ежегодно вырабатывается 1000 т пыли, что составляет 10 т/га — указывает А. Е. Менчуков. В Лос-Анджелесе только из-за износа автопокрышек в воздух попадает 50 т пыли в сутки. Общее количество твердых частиц, ежегодно выбрасываемых двигателями мирового транспорта, оценено Д. Мюллером в 5 млн. т. Большая часть этого количества, по-видимому, вырабатывается городским транспортом, работающим на бензине и дизельном топливе.

В составе аэрозолей городского воздуха содержится повышенное количество различных токсикантов. К числу последних принадлежат тяжелые металлы. Изучению их распределения в городском воздухе, пыли, сточных водах и др. посвящено большое количество работ.

В. Даннекер и К. Науман, исследовавшие состав твердых аэрозолей с крыши здания «Геоматикум» высотой 80 м (агломерация г. Гамбурга), установили повышенное содержание в них свинца, кадмия и ванадия. В месте наблюдения отсутствуют какие-либо локальные источники тяжелых металлов. Измерения производились в течение 45 дней. Среднее сухое выпадение пыли составило на высоте 3 м над крышей 121 мг/м²·сут, а на уровне крыши 208 мг/м²·сут. Выпадение частичек тяжелых металлов соответственно на верхнюю и нижнюю наблюдательные площадки характеризовалось такими цифрами; цинка — 581 и 1248, меди — 484 и 645, свинца — 200 и 312, ванадия — 189 и 393, кадмия — 8 и 31 нг/м²·сут. Одновременно была определена средняя концентрация этих элементов в воздухе, соста-

нившая для цинка 210, меди — 161, свинца — 273, ванадия — 52 и кадмия — 3,4 нг/м³.

Большое значение имеет вопрос о количественном вкладе различных источников, поставляющих тяжелые металлы в атмосферу. Р. Гринберг и соавторы показали, что во многих городах США основной причиной высоких концентраций в воздухе цинка, кадмия, сурьмы и, возможно, серебра, олова и индия является работа мусоросжигательных заводов. Сведения о содержании тяжелых металлов в воздухе американских городов приведены в табл. 33.

Данные табл. 33 показывают, что такие металлы, как медь и свинец, попадают в воздух городов из источников, не имеющих отношения к сжиганию мусора.

Основная масса свинца выбрасывается в атмосферу автотранспортом, работающим на этилированном бензине. Согласно Т. И. Кондратьевой, в США в 1970 г. двигателями внутреннего сгорания выброшено 300 тыс. т свинца, тогда как эмиссии других видов производств составили 18 тыс. т. Имеются указания на то, что и медь в городском воздухе в основном появляется вместе с выхлопными газами автотранспорта.

Особую природу имеет цинк. Он попадает в атмосферу городов из различных источников, но несомненно, что значительная его часть поступает при изнашивании шин.

В некоторых городах отмечается повышенное содержание в атмосфере кадмия, который по токсичности уступает только ртути и меди. Например, в Токио среднее содержание этого элемента в воздухе колебалось от 10 до 530 нг/м³. Наибольшее количество кадмия рассеивается в окружающую среду при его производстве и при переработке металлолома. Повышенные количества кадмия содержат выхлопные газы дизельных моторов.

Загрязнение воздуха и остальных компонентов окружающей среды токсичными элементами имеет место в районах действия комбинатов по выплавке тех или иных цветных металлов. У. Фрэнсин и соавторы изучали эту проблему в районе г. Флин-Флон (Канада). В названном городе с населением 10 тыс. чел. ежегодно перерабатывается 7300 т руды полиметаллов. Судя по модулям аккумуляции ряда тяжелых металлов, в окрестностях города функционирование металлургического завода создает беспрецедентно высокое загрязнение воздуха этими токсикатами.

В то же время выбросы предприятий черной металлургии, хотя и приводят к значительному загрязнению воздуха, но не являются такими токсичными. По данным В. Н. Калуцкова и А. А. Сирина, для металлургического завода полного цикла, выплавляющего около 6 млн. т стали в год, характерно поступление в атмосферу ежесуточно до 300 т пыли, до 50 т SO₂ и до 50 т NO₂. Выбрасываемая пыль на 50—90 % (в зависимости от производства) состоит из окислов железа, на 1—10 % из

Сравнение вычисленных концентраций ряда элементов в воздухе от работы мусоросжигательных заводов и наблюдаемых в городах США (по Р. Гринбергу и соавторам)*

Район наблюдений	Концентрация, нг/м ³											
	Cl	Br	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb	Ag	Sn	In
Вычисленные концентрации от сжигания мусора	480	3,6	3,6	290	0,58	0,089	3,6	5,0	190	1,2	28	0,013
Наблюдаемые концентрации:												
Бостон, 1970 г.	450	220	110	250	—	1,4	2,0	12,2	1190	—	—	—
Вашингтон, 1974 г.	140	190	13	150	5,7	3,5	3,5	9,7	1400	1,1	30	0,033
Пасадена, 1969 г.	70	600	30	180	—	—	—	—	3300	—	—	—
Пасадена, 1972 г.	—	720	160	76	—	—	—	—	2140	—	—	—
Сан-Франциско, 1970 г.	12 900	220	50	136	—	1,2	—	2,1	1360	0,15	—	—
Чикаго, 1968 г.	2 100	—	160	590	—	7,7	6	13	1500	4,3	—	—
Северо-Запад Индианы, 1969 г.	—	66	180	270	4,4	2,2	12	6,3	1700	<1,5	—	0,06
Нью-Йорк, 1969 г.	—	—	550	760	—	—	9,7	—	2200	—	—	—
Нью-Йорк, 1973 г.	—	—	61	320	—	—	7,0	—	1220	—	—	—
Сент-Луис, 1973 г.	—	194	<6	60	22	8	<26	—	570	—	<28	—
Сент-Луис, 1973 г.	402	78	79	240	4,3	2,7	15	1,05	400	—	—	—
Сельская местность	—	—	30	30	—	—	<1	—	<100	—	—	—

* При вычислениях принято, что вклад мусоросжигательных фабрик в среднем равняется 3 % от общей запыленности городской атмосферы. Среднее содержание пыли в ней принято 80 мкг/м³.

окислов кальция и магния, несколько процентов от общей массы пыли составляют окислы алюминия, фосфора и кремния. Выброс микроэлементов относительно невысок.

Серьезное загрязнение воздуха создает цементное производство, о чем можно судить по цифровым данным, характеризующим аккумуляцию цементной пыли.

В воздухе происходит трансформация многих ингредиентов антропогенных выбросов, в результате чего образуются так называемые вторичные аэрозоли. Кроме того, антропогенные городские аэрозоли смешиваются с присутствующими в атмосфере аэрозолями негородского происхождения.

Характер выпадения аэрозолей на города и примыкающие к ним территории зависит от динамики воздушных масс, осадков, а также от силы выброса загрязняющих веществ (наличие высоких труб) и архитектуры города с точки зрения ее приспособленности к очищающему действию ветров.

Изменение гидросферы

Антропогенное вмешательство в гидросферу на территории городов в первую очередь выражается в приспособлении природной дренажной сети и искусственных каналов стока к сбрасыванию сточных вод. Большие города часто используют воду, забираемую из смежных речных бассейнов по каналам или трубопроводам. Очень распространено водоснабжение из подземных водоносных пластов. Все это приводит к тому, что большие города сбрасывают в местные водотоки аномально большие количества воды.

В настоящее время в развитых странах затрачиваются большие средства на очистку коммунально-бытовых и промышленных стоков. Тем не менее сточные системы, питающие реки в пределах городов, сбрасывают в них повышенное количество загрязняющих веществ.

Большую роль в поддержании чистоты в городе играют поливомоечные работы. Еще лучше очищается городская территория и воздух при выпадении осадков. Образующиеся при этом талые или дождевые стоки выносят значительное количество загрязняющих веществ. О составе городских ливневых стоков можно судить на основании данных Дж. Джоди, изучавшего их в течение года в одном из районов г. Милоуки (США). Ливневые воды поступали в сточные трубы с двух водосборов. В пределах первого из них 65 % площади занимали жилые здания, 5 % — промышленные предприятия и 30 % — парки. В пределах второго промышленным предприятиям принадлежало 50 % площади, жилым зданиям — 45 % и паркам — только 5 %. Данные о составе ливневых стоков с этих участков даны в табл. 34.

Состав ливневых стоков с двух участков г. Милоуки (по Дж. Джоди)

Показатели и ингредиенты	1-й водосбор (площадь 13,8 га)		2-й водосбор (площадь 3,2 га)	
	средние значения	интервалы значений	средние значения	интервалы значений
БПК	17	1,8—45	30	8,6—90
Общее количество вещества, мг/л	5188	244—26 650	7380	156—54 120
в том числе:				
летучие вещества	393	55—1050	244	54—570
взвешенные наносы	235	0—1230	192	19—785
летучие взвешенные вещества	47	0—185	38	5—125
Cl ⁻ (как NaCl)	2606	30—26 000	4128	8—35 000
Ca ²⁺ (как CaCl ₂)	142	40—250	189	36—300
Общий азот	1,43	0,29—3,40	1,77	0,56—3,70
NH ₃	0,49	0,05—1,10	0,72	0,05—1,40
Общий фосфор	0,20	0,002—1,06	0,21	0,02—0,64
Растворенный кислород	11,0	9,2—12,2	10,3	7,2—11,8
NO ₃ ⁻ и NO ₂ ⁻	1,08	0,15—2,0	1,51	0,24—2,6
Pb	0,90	0,71—1,10	0,84	0,56—1,00
pH	7,7	6,3—9,0	7,9	7,2—9,3
t° воды	9,3	1—23	9	1—21
Показатель содержания фекальных элементов (MFFCC)	2750	100—6200	1600	1300—1900

На основании проведенных исследований Дж. Джоди сделал вывод о непригодности ливневых стоков с урбанизированных территорий для обитания рыб и целей рекреации.

Существенное загрязнение талых вод в городах создается из-за применения солей, стимулирующих таяние снега, а также из-за рассеивания песка на улицах при гололеде.

Аномально высокое загрязнение коммунальных городских стоков минеральными частичками возникает в районах строительства.

Неочищенные сточные воды предприятий отличаются от ливневых стоков меньшим содержанием взвешенных минеральных частиц и более сильной загрязненностью органическими веществами, фосфатами и нитратами.

Реки, протекающие через города, обычно приобретают такое количество наносов, которое вне урбанизированных территорий поступает в них с гораздо больших площадей. Например, из проносимых р. Потомак в районе г. Вашингтона 2 млн. т наносов пятая часть поступает с урбанизированных территорий,

занимающих только одну пятидесятую площади водосбора. В целом, как указывает И. М. Красовская, на индустриальном Востоке США не сельское хозяйство, а промышленность и строительство в основном загрязняют воды рек взвешенными наносами.

Изменение земной коры

Преобразование земной коры на урбанизированных территориях осуществляется очень интенсивно. Оно происходит при подземном и поверхностном перемещении вещества человеком, а также вследствие различного рода воздействий на нее. В первую очередь ими являются: 1) статическая нагрузка сооружений; 2) динамические нагрузки типа вибрации, толчков и др.; 3) непреднамеренное или преднамеренное вынужденное изменение запасов подземных вод; 4) тепловой поток от коллекторов, отапливаемых зданий, цехов и др.

Городское строительство и благоустройство — главное мероприятие по целенаправленному перемещению грунтов.

По подсчетам М. И. Хазанова [40], объем земляных работ при оборудовании и благоустройстве городов к 1964 г. составил 27,2, при строительстве жилых зданий — 3,8 и при возведении нежилых зданий — 3,6 млрд. т. Около 1,3 км³ грунта вынута к настоящему времени при строительстве метрополитенов.

Строительство, ремонтные работы, а также благоустройство городов включают такие виды деятельности, как искусственное укрепление грунтов путем их обжига, кольматации, утрамбовывания и др. Широко применяется восстановление на оголенных территориях почвенно-растительного слоя.

Стихийное накопление культурного слоя происходило во всех городах в прошлом. Сейчас оно продолжается фрагментарно на заводских дворах, в заброшенных карьерах и в других местах. Классификация антропогенных отложений, в которую включены и различные аккумулятивные образования городов, разработана В. Ф. Котловым [18].

Уплотнение пород под тяжестью зданий сопровождается уменьшением их влажности и пористости и увеличением объемной массы. Удельное давление от веса зданий, сооружений, насыпей и отвалов в современных городах колеблется от $0,1 \cdot 10^5$ до $20 \cdot 10^5$ Па и более. Высотное здание МГУ, как отмечает Ф. В. Котлов [17], возвышается на 180 м и имеет объем около 2 млн. м³. Уплотнение пород под действием веса здания вызвало осадку поверхности земли под его центром на 4,7 см. В целом здание МГУ и другие высотные дома Москвы создали своей тяжестью депрессии, замкнутый контур каждой из которых находится снаружи на расстоянии 50—120 м от периметра зданий.

При плотной застройке депрессии проседания своими внешними краями смыкаются и под городом возникает крупноплощадная депрессия сотообразного строения. Площадь таких депрессий бывает от долей до 3500 км² и более.

При возведении конструкций на илах, сапропелях и торфяниках их осадка может достигать очень больших величин. Например, в г. Архангельске, где 80 % территории сложено торфяниками, отдельные дома опустились на 1—3, а участки дорог на 3—4 м. В грунтах, содержащих большое количество органического вещества, уплотнение вызывает быстрое окисление последнего.

Особенно опасны для сооружений неравномерные осадки. Знаменитая Пизанская башня просела всего на 2 м, но разница опускания основания между его северным и южным краями составила 1,8 м, что привело к отклонению башни от вертикального положения на 10° [17].

Динамические нагрузки (вибрация, удары, толчки и др.) уплотняют раздельно-зернистые рыхлые и недоуплотненные грунты. Кроме того, они могут разрушать структуру непрочных тиксотропных грунтов. Песчаные грунты значительно больше уплотняются при пульсирующей нагрузке, чем при статической.

В Москве здания, расположенные вдоль улиц с интенсивным движением транспорта, осели в среднем на 3—8 мм больше, чем находящиеся в переулках и тупиках. Среди зданий, находящихся в зоне вибрационного влияния метро, есть такие, которые подверглись дополнительной осадке на 5—20 см. Однако мульды проседания, согласно Ф. В. Котлову [17], над линиями метро образуются вследствие совокупного действия нескольких процессов: 1) гравитационного уплотнения сжимаемых пород основания, 2) гидродинамического уплотнения при дренаже и 3) уплотнения под действием вибрации от движения поездов.

Оврагообразование иногда происходит очень интенсивно при сбросе сточных вод или утечках из водопроводной сети. Нередко оно стимулируется таянием снега, вывезенного в небольшие ложбины или на оголенные склоны. Скорость роста таких оврагов, обычно находящихся на городских окраинах, сильно варьирует, но, как правило, она больше скорости оврагообразования на неполивных сельскохозяйственных землях.

Понижение уровней подземных вод. Для крупных городов характерен отрицательный баланс водоносных горизонтов из-за уменьшения инфильтрации поверхностных вод на 30—80 %. Уже по этой причине происходит понижение уровней подземных вод и формирование депрессионных воронок в них на величину 100—300 м. Однако там, где подземные воды под городами истощаются в результате их использования для водоснабжения, масштабы водопонижения резко увеличиваются.

Депрессионные воронки под такими городами достигают многих сотен и даже тысячи метров [17].

Оседание земной поверхности, связанное с водопонижением под городами, а иногда, кроме того, с извлечением нефти и газа, имеет тот же механизм, что и при откачках подземных вод для орошения земель или защиты горнодобывающих предприятий от затопления. Примерно одинаковы и масштабы оседания, достигающие обычно первых метров. Максимальное опускание земной поверхности, равное 9 м, зафиксировано в пределах г. Мехико. На 8,6 м опустился г. Тайбей на Тайване, на 4,3 м — г. Токио и на 3,1 м — г. Осака в Японии (см. табл. 7).

Уплотнение пород при обезвоживании корнями деревьев происходит на тех городских участках, где распространены глинистые грунты. Деревья забирают содержащуюся в них влагу даже из очень мелких пор. По мере осушения глини корни деревьев прорастают дальше и осушают новые участки. В результате обезвоженные глинистые грунты уплотняются, происходит их неравномерное оседание, а это вызывает деформацию расположенных на них уличных покрытий и даже зданий.

Сдвигание грунтов в массиве, образование мульд проседания и провалов в городах, расположенных на подрабатываемых территориях, наносит очень большой материальный ущерб, так как приводит к разрушению дорог, мостов, каналов, зданий, подземных магистралей и др. В СССР такие явления имеют место в Кривом Роге, Караганде, Прокопьевске, Осинниках, Ленинск-Кузнецке, Донецке, Горловке, Кадиевке, Макеевке и др. [17].

Повышение уровня подземных вод под городами обычно связано с созданием вблизи них водохранилищ, но, кроме того, возможно из-за значительных утечек воды из городской сети. Этот процесс может иметь опасные последствия там, где он ведет к активизации суффозии, карста, туннельной эрозии и др. Провалы и просадки, развивающиеся при этом, приводят к разрушению зданий и разрыву коммуникаций, а повышение влажности глинистых грунтов, обладающих способностью к набуханию, вызывает увеличение их объема, что часто приводит к неравномерному выпучиванию конструкций и их повреждению.

Процессы в криолитоze. *Изменение положения верхней границы многолетнемерзлых пород* является обычным результатом отепляющего влияния города, осложняемого менее распространенным эффектом выхолаживания. В. М. Горбачева, изучившая тепловой режим грунтов г. Воркуты, указывает, что в пределах этого города перераспределение составляющих теплового баланса в летний период приводит к возрастанию теплового потока в грунт на 15—20 % по сравнению с обычным.

В зимний период теплотери грунта определяются в основном высотой снежного покрова и благодаря повышенным снегоотложениям в городе они меньше. Увеличение теплового потока в грунт привело к тому, что в настоящее время 80—90 % территории города, где до застройки сезонное промерзание сливалось с многолетнемерзлой толщей, приходится на участки с глубоким залеганием многолетнемерзлых пород. Лишь там, где снег удаляется или уплотняется (в основном это делается на городских транспортных магистралях), имеет место противоположный процесс — понижение температуры многолетнемерзлых пород.

Термопросадки. Отопляющее воздействие сооружений, ведущее к протаиванию грунтов, в зависимости от литологического состава приводит к различным по величине просадкам. Меньше всего проседают гравийно-галечниковые грунты — на 0,5—4,5 % от глубины протаивания. У песков и супесей этот показатель равняется 4—6, у суглинков с обломочным материалом — 7—20, у глин — 6—4, у торфяников — 60—80 и подземных льдов — 100 % [17].

Скорость термопросадок 4—6, реже 12 мм/сут. Их величина часто достигает первых метров и более. В Воркуте, как указывает Ф. В. Котлов, средние просадки зданий составляют 2—5, а максимальные 5—9,5 м. Срок службы деформированных зданий сокращается до 10—30 лет.

Искусственное отопление в городах и поселках грунтов, содержащих подземный лед, приводит к возникновению термокарстовых западин, а иногда и линейных понижений. Заполнение их водой с образованием небольших озер усиливает протаивание подземных льдов и формирование отрицательных форм рельефа. Термокарстовые впадины могут формироваться со скоростями, на порядок большими, чем при обычных термопросадках.

Природно-антропогенные процессы

Городская среда оказывает существенное трансформирующее воздействие на режим температур, воздушные потоки, выпадение осадков и другие составляющие климата, от которых зависят многие особенности природно-антропогенных процессов.

По климатическим условиям урбанизированные территории существенно отличаются от прилегающих сельских мест. В городах понижена прозрачность атмосферы, выше ее облачность, чаще туманы и выпадение осадков, ниже относительная влажность воздуха, меньше приход солнечной радиации и скорости ветра, но выше среднегодовые температуры.

Нагревание воздуха в городах за счет рассеивания тепла, используемого при различных мероприятиях (обогрев, движение транспорта, промышленное производство и др.), как свидетель-

ствуется табл. 32, может быть очень значительным. Например, в Москве зимой среднесуточные температуры в центре города на 2—3 °С выше, чем на окраинах. В ясную тихую погоду в центре Воркуты на 5—6 °С теплее, чем вне города. По расчетам В. М. Горбачевой, среднегодовая температура в этом населенном пункте на 1,3 °С выше нормы. В Фербенксе (Аляска, США) разность температур воздуха внутри города и вне его зимой достигает 14 °С. Летом в городах аномально жарко. Асфальтовое покрытие от солнечных лучей может нагреваться до 70—78 °С. Известную роль в отоплении больших городов может играть и повышенное содержание в их атмосфере CO₂. Средняя концентрация этого газа в воздухе больших городов, по-видимому, уже превысила 500 частей на миллион.

Благодаря наличию высоких температур в городах умеренного пояса по сравнению с пригородом на 10—12 дней продолжительнее безморозный период и на 5—10 дней короче период со снежным покровом.

Как показывают исследования на территории СССР, испаряемость с урбанизированных площадей оказывается на 5—20 % выше, чем на прилегающих сельских территориях [20]. Потребляя большое количество поверхностных и подземных вод, часто заимствуя их из сопредельных бассейнов, оттягивая на себя повышенное количество осадков и также в повышенном количестве возвращая влагу в атмосферу, города усиливают циркуляцию атмосферных, поверхностных, а иногда и подземных вод. Таким образом, обстановка, в которой развиваются антропогенно-природные экзодинамические процессы, является весьма специфической.

Выветривание и другие процессы разрушения. Несмотря на то что городские покрытия, а также различные сооружения и здания весьма устойчивы к воздействию обычных агентов денудации, даже они подвергаются разрушению. Выпадающие на городскую территорию осадки обладают повышенной агрессивностью, поскольку они представляют собой растворы ряда кислот, солей, органических веществ с примесью мелких твердых частиц. Кроме того, резкие гидротермические колебания, а также прямое воздействие ингредиентов городской атмосферы создают благоприятную обстановку для разрушения искусственных материалов городских объектов.

Воздействие загрязненного воздуха и атмосферных осадков лучше всего обнаруживается при изучении изменений, происходящих с городскими архитектурными памятниками. Дж. Йоком установил, что всемирно известный греческий Акрополь в Афинах подвергается следующим вредным атмосферным воздействиям: 1) коррозии в результате ударов твердых частиц; 2) накоплению и переотложению твердых частиц, наличие которых усиливает многие реакции с участием загрязняющих газообразных веществ; 3) прямому химическому разрушению, в особен-

ности при реакциях серного и сернистого газа с материалами из мрамора и известняка с образованием легко растворимого гипса; 4) косвенному химическому разрушению при адсорбции в поверхностном слое газообразных соединений серы, превращающихся затем в серную кислоту, которая ослабляет этот слой; 5) электрохимической коррозии вследствие того, что серонокислые газы в присутствии влаги увеличивают электропроводность железа, стали и других металлов и тем самым ускоряют их разрушение.

Присутствие загрязняющих веществ — настоящий бич архитектурных памятников, находящихся на открытом воздухе. За 2240 лет доиндустриального времени фриз на храме Парфенона в Акрополе изменились гораздо меньше, чем за последующие 136 лет, с 1802 до 1938 г. Это удалось установить, сравнив слепки с фриза и сделанные спустя 136 лет с этих же фризов фотографии.

Изучение особенностей разрушения греческого Акрополя показывает, что в современных городах процессы выветривания весьма активны и имеют специфический характер.

Эоловые процессы. В пределах городов ветер поднимает значительные количества пыли со всех поверхностей, не защищенных растительностью. Дымовые трубы, вытяжные устройства, уборочные машины и городской транспорт поставляют большое количество аэрозолей в воздушные массы, в результате чего концентрация примесей в них в среднем всегда на 2—3 порядка выше, чем в воздухе сельской местности. Жидкие и твердые аэрозоли вымываются осадками из городской атмосферы обычно в количестве от 450 до 5000 мг/л [20]. В среднем для умеренного пояса северного полушария этот процесс выражается цифрами от 2,2 до 25 т/га·год.

Однако для районов с высокой концентрацией производства эоловый перенос и аккумуляция аэрозолей определяются гораздо большими цифрами. Так, согласно К. К. Кудло, в Минске, в районе крупных промышленных предприятий в почву поступает от 0,07 до 0,12 т/га пыли в год.

С. Грязб пишет, что проведенное в 1974—1975 гг. обследование территории вблизи цементного завода Огороденец (Польша) показало, что в зоне радиусом 0,5—0,7 км выбросы цементной пыли составляли 5—8 т/га ежегодно, в зоне от 0,7 до 1,5 км — 2,5—5,0 т/га, а в зоне свыше 1,5 км — менее 2,5 т/га. Выбрасываемая цементная пыль содержала много кальция (30,7 %), калия (3,0 %), железа (2,3 %), значительные количества магния, иода, натрия, высокие следовые количества марганца, цинка, меди, кобальта, свинца и кадмия.

Велико поступление эолового материала в городах и их окрестностях на Крайнем Севере.

Согласно В. М. Горбачевой только за зиму в Воркуте накапливается 15 т пыли на гектар. А. Н. Кулиев и В. А. Лобанов

исследовали особенности загрязнения тундры в районе упомянутого города золовыми выносами. Особенности аккумуляции последних определяются наличием устойчивых ветров и отсутствием высоких естественных препятствий в этой части тундры. Поэтому городские дымо-газовые шлейфы здесь часто простираются на 50 км. Осенью, а особенно в зимнее время инверсионные процессы в атмосфере приводят к застаиванию загрязненного воздуха над Воркутинским промышленным комплексом.

Загрязняющие вещества поступают в тундру как от отдельных мощных источников (высокие трубы ТЭЦ города, цементного завода и других предприятий), так и от многочисленных котельных шахт, жилищно-коммунальных хозяйств, а также отопительных систем домов и учреждений. Антропогенные выбросы усиливаются в зимнее время.

Непосредственно вблизи города выпадают тяжелые фракции пыли, состоящие из частиц горных пород. Несколько дальше оседают более мелкие частицы сажи и другие легкие компоненты пыли. На значительных расстояниях в тундру попадают мелкие частицы пыли и аэрозоли промышленных загрязнений, содержащие активные химические элементы и их соединения.

Преобладание южных ветров и особенности расположения предприятий обуславливают оседание основной массы пылевидных выбросов в северной части района. В окрестностях Воркутинского промышленного комплекса околонуено 5 зон с различным загрязнением. Расположение их показано на рис. 13. Характеристика зон дана в табл. 35.

Выплавка цветных металлов в районе г. Флин-Флон приводит к загрязнению площади в 250 тыс. км². На расстоянии 4,3 км от плавильного комбината выпадение цинка составляет 1780 (5), кадмия 4,5 (0,018), свинца 42 (0,115), мышьяка 6,2 (0,017) и меди 57 мг/м²·год (0,156 мг/м²·сут). Приведенные цифры среднесуточного выпадения тяжелых металлов вокруг плавильного комбината на три-четыре порядка больше анало-

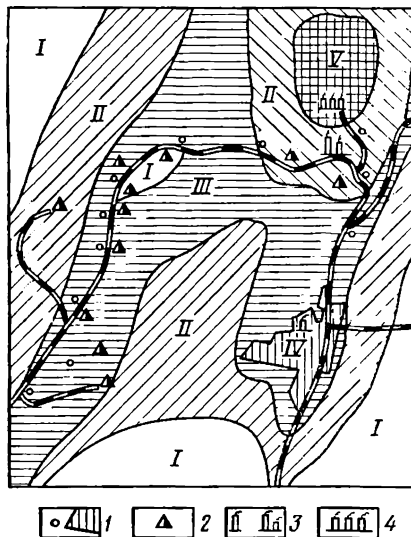


Рис. 13. Зоны запыленности снежного покрова окрестностей г. Воркуты (по А. Н. Кулиеву и В. А. Лобанову, 1979 г.):

1 — поселки и г. Воркута; 2 — терриконы; 3 — ТЭЦ; 4 — цемязавод; I—V — зоны запыленности (см. табл. 35)

**Содержание пыли в зонах запыленности снежного покрова окрестностей
г. Воркуты (по А. Н. Кулиеву и В. А. Лобанову)**

Зоны	Количество пыли в снегу, т/га	Источники загрязнения
I — фоновая	0,06—0,18	Атмосфера, оголенная поверхность тундры
II — малого загрязнения	От 0,12 до 0,4	Воркутинский промышленный комплекс
III — среднего загрязнения	От 0,4 до 1,6	Отопительные системы поселков
IV — сильного загрязнения	От 1,6 до 6,4	Терриконы шахт, железные дороги
V — максимального	Более 6,4; местами до 23,1	ТЭЦ, цементный завод

гичных показателей для городской среды вне воздействия каких-либо сильных локальных источников выброса рассматриваемых токсикантов (сравните цифры по г. Флин-Флон и агломерации Гамбурга). Из этого можно сделать вывод, что функционирование заводов по выплавке цветных металлов создает очень сильное загрязнение токсическими веществами.

Поверхностный смыв. Годовой сток с городских территорий обычно больше, чем в естественных условиях. Это сказывается на поверхностном смыве, который естественным путем формируется при дождях и снеготаянии. Интенсификации поверхностного смыва способствует преимущественная оголенность городского рельефа, разреженность растительного покрова озелененных участков. Например, на территории Киева во время ливней осуществляется интенсивная плоскостная эрозия. После дождей на тротуарах и мостовых города остается большое количество пылеватого и песчаного материала, выносимого из прилегающих дворов. После одного из ливней в июне 1963 г. На Набережном шоссе слой вынесенного лёссово-песчаного материала достигал 15 см [20].

Основными источниками выноса обломочного материала в городах служат стройплощадки, на которых поверхностная эрозия происходит очень энергично. Согласно М. Вольману, со строительных площадок поверхностным смывом обычно удаляется от 50 до 300 (табл. 36), а иногда до 500 т/га-год и больше.

На примере востока США установлено, что механическая денудация в местах строительства в 10 раз больше, чем в местах посадок пропашных культур, в 200 раз больше, чем на пастбищах, и в 2000 раз больше, чем на лесных территориях. Стабилизированные площади в пределах городов обычно постав-

Оценки модуля твердого стока и изменений скоростей денудации на участках, подвергающихся урбанизации (по М. Вольману)

Местоположение	Общая площадь водосбора, км ²	Процент застраиваемой площади	Модуль твердого стока т/га·год	Отношение современной скорости денудации к ее скорости до урбанизации
Восток США	2,0	10	300	60
То же	0,20	73	50	100
Экстер (Великобритания)	0,26	25	—	31
Оттава (Канада)	62	0,04	—	—
Япония	0,45	100	125	10

ляют с поверхностным смывом десятки тонн обломочного материала с каждого гектара. Этому в значительной мере способствует перераспределение материала грунтов стройплощадок в близлежащие части города с ветром и автотранспортом. Поверхностный смыв и сопряженные с ним естественные и искусственные способы удаления продуктов денудации выполняют важную роль в очищении городов от загрязняющих веществ. Поскольку смыв с урбанизированных территорий происходит в условиях определенного увеличения количества осадков, можно считать, что урбанизированным территориям свойствен определеннный эффект самоочищения.

Овражная эрозия в городах, как указывалось выше, часто стимулируется увеличением водности временных водотоков за счет антропогенных источников. Однако и без этого она может проявляться очень интенсивно. Например, на территории Киева имеется большое количество оврагов, в основном привязанных к долинам рек Днепра и Лыбеди. Длина оврагов достигает 2—5 км, глубина 50 м, ширина поверху 1,2 км. Оврагообразованию здесь благоприятствует большая мощность (около 100 м) толщи легкоразмываемых пород, залегающих выше базиса эрозии. В ряде случаев оно дополнительно интенсифицируется антропогенными стоками [20].

Оползни. Провоцирование оползневых процессов в городах происходит под воздействием ряда факторов. Наиболее обычными из них являются: 1) подрезка склонов, 2) дополнительная нагрузка на неустойчивые массы пород, 3) обводнение таких пород и 4) динамические нагрузки [18]. В СССР оползневые процессы имеют место в городах Баку, Горьком, Ульяновске, Волгограде, Киеве, Кишеневе, Сочи и др.

Загрязнение подземных вод на урбанизированных территориях происходит главным образом в результате таких процессов: 1) фильтрации загрязненных дождевых, талых и по-

ливо-мочных вод; 2) потери воды в системах канализации и очистных сооружений и 3) проникновения в водоносные горизонты стоков с мест захоронения твердых отходов. Установлено, что в районах некоторых городов и промышленных центров загрязнение подземных вод весьма высокое. Показательны в этом отношении данные К. Эсен и М. Андерсон по качеству подземных вод района г. Милуоки (штат Висконсин, США). Пробы подземных вод с водосборной площади р. Меномони, занятой городской застройкой, характеризуются высокими концентрациями хлоридов (180 мг/л) и сульфатов (190 мг/л). Кроме того, они содержат значительное количество аммония (до 3 мг/л), им присуще фекальное загрязнение и наличие стрептококковых бактерий. По мнению упомянутых авторов, привнос загрязняющих веществ в подземные воды в г. Милуоки связан с инфильтрацией вод р. Меномони, загрязненных хозяйственно-бытовыми и промышленными отходами, а также выносами сточных канав. Дополнительное заражение хлоридами возможно вследствие инфильтрации соленых вод с дорог. Таким образом, там, где в пределах городских территорий реки оказываются как бы подвешенными над депрессионными воронками уровня подземных вод, речные воды оказываются едва ли не главным промежуточным коллектором загрязняющих веществ, из которого последние поступают в подземные водоносные горизонты.

Влияние урбано-промышленных мероприятий на экзодинамику негородских территорий

Уничтожение и дигрессия почвенно-растительного покрова от дымо-газовых выбросов. Урбанизированные территории оказывают мощное воздействие на смежные с ними площади. Особенно вредоносными оказываются дымо-газовые эмиссии заводов, выправляющих цветные металлы. Так, по данным И. И. Шиловой и соавторов, в лесной зоне одного из районов Урала очень значительное изменение почвенно-растительного покрова и, как следствие этого, экзодинамических процессов произошло в результате воздействия выбросов медеплавильного комбината в течение 40—50 лет. Выделены семь зон различного изменения природного ландшафта.

Первая зона (коренного изменения) — «газогенная пустошь» с полностью разрушенной почвой, которая превращена в техногенный субстрат, бесплодный и фитотоксичный.

Вторая зона (очень сильного изменения) — с нарушенной почвой (горизонт A_0 местами уничтожен и обнажен горизонт A_1) и фрагментарным травянистым покровом. Древесный и кустарниковый ярусы представлены усыхающими хвойными (гибель их 90—100 %) и низкорослыми, в сильной степени поврежденными лиственными.

Третья зона (сильного изменения) — характеризуется слабой эрозией почв, присутствием почвенной подстилки, наличием разреженного травяного покрова с общим проективным покрытием в среднем 30 %. Оголенные участки встречаются спорадически лиственные породы повреждены в средней степени, гибель хвойных 50—90 %.

Четвертой зоне (значительного изменения) свойствен ненарушенный почвенный покров и моховой ярус, удовлетворительно развитая травянистая растительность с проективным покрытием в среднем 50 %. Лиственные породы находятся в удовлетворительном состоянии, гибель хвойных 15—50 %.

Пятая зона (среднего изменения) — с ненарушенным почвенным покровом, моховым и травянисто-кустарничковым ярусами. Гибель хвойных 5—15 %.

Шестая зона (слабого изменения), в которой нарушение фитоценозов сводится к слабому повреждению хвойных.

Седьмая зона (очень слабого изменения) — отличается от смежной неизменной территории наличием признаков ухудшения состояния хвойной растительности.

Г. С. Макунина изучила последствия воздействия медеплавильного производства, которое с небольшим перерывом осуществляется уже около 150 лет в одном из районов предгорья Южного Урала. Она указывает, что в зоне нарушенных урочищ, которая примерно соответствует первой и второй зонам И. И. Шиловой и соавторов, очень интенсивно проявляются эрозионные процессы. На склонах хребта в пределах зоны нарушенных урочищ сформировалась густая сеть промоин V-образной и трапециевидной форм (глубиной до 0,8 м). Промоины сходятся в средней части склона, образуя овраги до 2,5 м и шириной днищ до 2 м, выполненные разнозернистыми песками с обломками метасоматитов. У подножия склонов высота оврагов уменьшается до 0,3 м, а ширина днищ увеличивается до 7 м. Овражные выносы образуют у подножия единый пролювиальный шлейф. В бортах оврагов развиваются небольшие оползни и обвалы. Зона нарушенных урочищ имеет площадь 28 км² и окаймляется зоной сильно измененных и слабоэродированных урочищ. Площадь этой зоны около 40 км². В ее пределах достаточно сильно проявлена плоскостная эрозия.

Полное уничтожение почвенно-растительного покрова и его дигрессия в районах, подверженных техногенной интоксикации, — одно из наглядных следствий вмешательства человека в природный круговорот тяжелых металлов.

Сильное негативное воздействие на почвы и растительность оказывает обычная городская загазованность воздуха, когда она превышает допустимые пределы.

В Рурском бассейне (ФРГ) из-за постоянного загрязнения воздуха деревья прекращают рост в высоту и, разрастаясь в боковых направлениях, улавливают еще больше загрязняю-

щих веществ, что еще больше тормозит их рост. Если за пределами Рура (в 10 км от северной границы) 70-летние насаждения сосны имеют среднюю высоту деревьев 20 м и диаметр ствола 27 см, то в зоне загрязнения эти показатели у них соответственно равны 7 м и 25 см.

Дигрессия почвенно-растительного покрова от кислых осадков. Еще 200 лет назад дождевая и снеговая вода была практически нейтральной, тогда как в настоящее время она стала представлять собой слабый раствор серной и азотной кислот. Дождевые осадки с самым значительным показателем кислотности ($pH=2,4$) были зафиксированы в 1974 г. в Шотландии.

В настоящее время к кислым относят осадки, pH которых ниже 5,6. По мнению Г. Лайкенса и соавторов, главная причина кислых дождей — дымово-газовые эмиссии от сжигания ископаемого топлива, в составе которых содержатся окислы серы и азота, имеющие свойство переноситься с воздушными массами на значительные расстояния. Строительство высоких труб (в 1975 г. в мире насчитывалось 15 труб высотой более 300 м) резко увеличило далекий трансрегиональный разнос аэрозолей, с которыми связано выпадение кислых осадков.

Воздействие кислых дождей и талых вод на почвенно-растительный покров приводит к негативным последствиям. К. Тэм и Е. Коулинг перечисляют следующие виды таких последствий для растений: 1) ущерб защитному поверхностному слою растений, такому, как кутикула; 2) помеха нормальному функционированию защитных клеток; 3) отравление клеток растения после диффузии кислых веществ в них или 4) нарушение нормального метаболизма и роста клеток; 5) изменение процессов выделения в листьях и корнях; 6) помеха репродукционным процессам; 7) усиление реакции растений на воздействие других загрязняющих веществ; 8) увеличение чувствительности растений на такие явления, как засухи, распространение вредителей; 9) ослабление деятельности азотофиксирующих бактерий и многих других организмов, находящихся в почве.

Перечень основных явлений, вызываемых кислыми осадками в почве, согласно С. Нортону, выглядит так: 1) возрастание подвижности большинства элементов; 2) ускорение разрушения глинистых минералов, содержащих щелочные и щелочноземельные элементы; 3) изменение емкости поглощения и состава обменных катионов; 4) общее возрастание скорости выноса всех катионов (для бедных почв этот процесс может стать очень существенным в течение десятилетий); 5) усиление выноса биогенных веществ.

В работах других авторов показано, что кислые дожди, кроме того, оказывают отрицательное воздействие на корни растений и поглощение ими питательных веществ. Нередко они так изменяют листовую поверхность растений, что это приводит

к снижению интенсивности фотосинтеза. Таким образом, в целом кислые осадки вызывают определенную дигрессию растительного покрова и снижение плодородия почв. Они замедляют темпы биологического круговорота, ускоряют процессы миграции вещества и тем самым подрывают подвижное равновесие, существующее в природных наземных экосистемах. Огромный негативный эффект кислые дожди и талые воды оказывают на водные экосистемы.

Кислые осадки сейчас имеют широкое распространение, особенно в северном полушарии, где сжигается большая часть извлекаемого ископаемого топлива. Они наиболее типичны для стран Средней Европы и юга Фенноскандии, а также для востока Северной Америки.

Итак, на городских территориях, где сейчас живет большая часть мирового населения, концентрируются и используются огромные количества вещества и энергии. Из-за этого функционирование городов и их рост оказывают очень сильное, в основном негативное воздействие на геологическую среду и атмосферу в масштабах, намного превышающих размеры городских территорий.

КОММУНИКАЦИОННО-ТРАНСПОРТНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ И ИХ СЛЕДСТВИЯ

Для перевозок грузов и переездов человек издавна пользуется наземным и водным транспортом, к которому сравнительно недавно добавились воздушный, подземный и подводный. В настоящее время поверхность суши густо покрыта транспортно-коммуникационными линиями, по которым почти непрерывно перемещаются грузовые и грузо-пассажирские потоки или же передается энергия. Такими объектами в первую очередь являются: 1) автодороги, 2) железные дороги, 3) магистральные трубопроводы и 4) линии электропередач*.

Линейные сооружения подвергаются весьма значительному воздействию природных и природно-антропогенных процессов, так как накладываются на разные элементы рельефа, в пределах которых перемещаются самые различные по мощности и режиму природные или природно-антропогенные потоки вещества. В то же время линейные объекты сами оказывают значительное воздействие на участки земной коры, к которым они приурочены, на смежные с ними зоны, а иногда и на более отдаленные пространства. Особенно большие изменения в поверхностной части земной коры вносятся в период строительства линейных объектов. Эксплуатация последних, если она ведется на основе всестороннего учета их взаимодействия с окружаю-

* Экзодинамическая роль ЛЭП не рассматривается из-за недостатка материала.

шей средой, также сказывается на экзодинамике зоны каждого линейного сооружения, но это влияние оказывается уже не таким сильным. Приведем некоторые сведения, характеризующие специфику экзодинамических процессов в зависимости от типа линейного сооружения.

Автомобильные дороги

Площади, занимаемые автодорогами, очень велики. Достаточно сказать, что в развитых странах, например в США, под автострадами и железными дорогами с дополняющими их объектами находится такое количество земли, которое лишь немного уступает площади урбанизированных территорий. Протяженность автодорог в мире на порядок больше суммарной длины железных дорог. Длина последних в настоящее время, по-видимому, близка к 1,3 млн. км [40]. В СССР в 1978 г. протяженность автодорог с твердым покрытием достигала 741,6 тыс. км.

Объем искусственных грунтов, образованных при строительстве местных и магистральных шоссеиных дорог, по данным этого же автора, к 1962 г. составлял 210 млрд. м³. Это больше, чем при всех других видах строительства, вместе взятых.

Поистине огромное строительство автодорог развернуто в настоящее время в ряде стран. Автодороги строятся как для форсированного освоения девственных территорий, так и со вспомогательными целями — вдоль железных дорог и магистральных трубопроводов.

Колоссальный скачок в дорожном строительстве произошел в Бразилии после 1964 г. в связи с освоением принадлежащей ей большей части бассейна р. Амазонки. Сеть асфальтированных дорог в этой стране выросла между 1964 и 1976 гг. в три раза. Очень велика также протяженность грунтовых дорог (рис. 14). В 1975 г. было закончено строительство Трансамазонской автомагистрали общей длиной 5600 км. Для ее строительства на отрезке в 3500 км вырубалась просека шириной 70 м в тропическом дождевом лесу. Всего под дорогами в бассейне р. Амазонки к 1980 г. должно быть занято 4 млн. га.

Антропогенные процессы - мероприятия. Строительство дорог, согласно В. В. Михайлову и соавторам, осуществляется в два последовательных цикла. В первый входят работы по сооружению земляного полотна дороги. Этот цикл составляют: 1) подготовительные работы (восстановление и закрепление трассы дороги, расчистка дорожной полосы от растительности и камней, обозначение контуров будущего земляного полотна, снятие почвенного слоя с поверхности будущих выемок и оснований насыпей, резервов и боковых канав и консервация его в валиках); 2) возведение насыпей и разработка

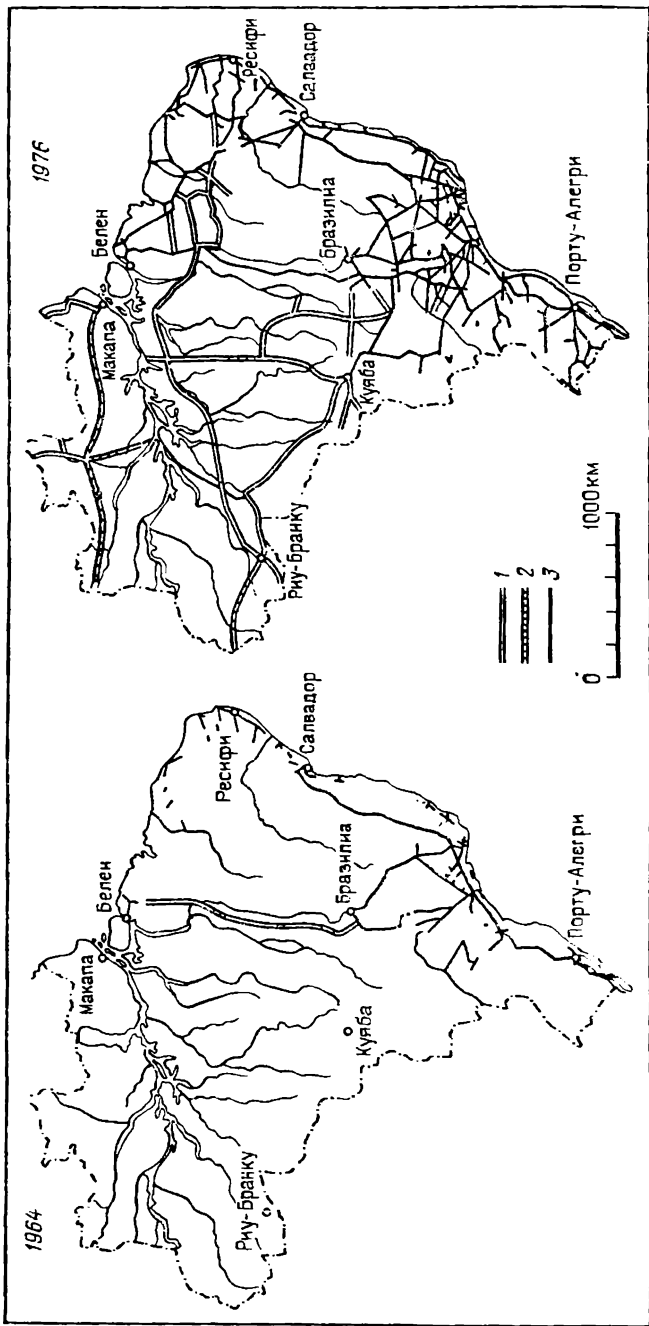


Рис. 14. Схемы действующих и строящихся дорог в Бразилии в 1964 и 1976 гг. (по Колепу, 1978 г.):
 1 — грунтовые; 2 — грунтовые строящиеся; 3 — асфальтовые

выемок; 3) устройство водоотводных и дренажных сооружений; 4) уплотнение грунтов; 5) планировочные, отделочные и укрепительные работы.

После создания земляного дорожного полотна той или иной протяженности осуществляется второй цикл работ по строительству дорожной «одежды».

Сооружение автодорог сопряжено с необходимостью добычи и производства строительных материалов. Поэтому на трассах строительства, помимо собственно дорожно-строительных работ, обычно осуществляются добыча, переработка и промышленное производство материалов, необходимых для создания автодороги.

Дороги ограждаются снегозащитными сооружениями или заслонами из деревьев и кустарников. При эксплуатации автодорог для борьбы со скользкостью применяют посыпку золой, песка и т. п. в количестве от 0,1 до 0,4 м³ на 1000 м² в зависимости от степени потенциальной аварийности участка. Расход солей для борьбы с гололедом обычно составляет 0,15—0,4 кг/м², но в СССР в связи с их вредным воздействием на бетонные покрытия и сильным коррозийным действием раствора солей на автомобили этот метод не нашел широкого распространения, тогда как, например, в ФРГ количество ежегодно рассеиваемых на дорогах хлористого кальция и хлористого натрия в сумме достигает 1 млн. т.

Антропогенные процессы-следствия в зонах автодорог можно подразделить на две категории. В первую входят экзодинамические процессы, прямо обусловленные перераспределением грунтов и изменением рельефа в связи с появлением дороги. Это осыпи и обвалы на таких участках, где дорога проходит в выемках, осадка дорожной насыпи на грунтах с низкой несущей способностью, уплотнение насыпи и т. п. Ко второй группе экзодинамических процессов-следствий относятся: 1) выработка пыли движущимся транспортом (на участке автострады шириной 10 м и длиной 100 км автотранспорт продуцирует свыше 1000 т пыли в год); 2) рассеивание вокруг дороги загрязняющих веществ — твердых частиц, угарного газа, углеводородов, окислов азота и серы, сажи, некоторых тяжелых металлов (в особенности свинца).

Загрязнение соединениями свинца (оксидами, галоидами, сульфатами, фосфатами, карбонатами и др.) вблизи автодорог изучалось многими авторами. Г. Уилер и Г. Рольф собрали данные о рассеивании свинца около четырех скоростных трасс в штате Иллинойс (США). Содержащие свинец крупные частицы (размером более 9 мкм и массой 0,019 г) быстро оседают на расстоянии не более 5 м от обочин и относительно инертны в геохимическом отношении. Медленнее оседают мелкие частицы, содержащие свинец. Они разносятся на расстояние до 100 м и, таким образом, загрязняют полосу шириной 200 м без учета

поперечника автострады. Выбросы, содержащие тонкодисперсные соединения свинца, оказываются наиболее токсичными.

По данным Р. Мильберга и соавторов, производивших сходные наблюдения в штате Мэриленд (США), максимальное осаждение тонкодисперсных соединений свинца в интервале от 8 до 50 м от автомагистрали приходится на полосу между 8-м и 25-м метрами. Здесь накапливается 95—98 % их количества, проходящегося на указанную полосу. В полосе интенсивной аккумуляции в верхний 10-сантиметровый слой поступает $0,85 \pm 0,16$ мкг свинца на каждый грамм почвы в результате проезда 10 тыс. передвижных средств, применяющих топлива с добавками соединений свинца. Замечено, что скорость накопления по ветру была выше и составляла на расстоянии 8 м от дороги $2,06 \pm 0,73$ мкг свинца по сравнению с $1,04 \pm 0,26$ мкг против ветра.

Рассеивание загрязняющих веществ в придорожной полосе наиболее существенно сказывается на природных объектах в тех случаях, когда дорога проходит по берегу реки или озера. В водоемах может существенно ухудшаться качество воды, увеличиваться ее мутность, нарушаться биологические процессы.

Природно-антропогенные процессы также могут быть разделены на две группы. В первую входят обычные ускоренные экодинамические процессы, чаще возникающие в стадии дорожного строительства. Сюда относятся: 1) оползни, связанные с подрезкой или перегрузкой склонов; 2) заболачивание и подтопление при подпруживании дорожной насыпью суходолов, по которым стекают талые и дождевые воды; 3) ускоренная плоскостная, бороздковая, а местами и мелкоовражная эрозия на обнаженных участках и, в частности, на дорожной насыпи; 4) изменение режима гидротермических и мерзлотных процессов в местах нарушения и уничтожения растительного покрова.

Ускоренная эрозия является наиболее универсальным процессом, поскольку при строительстве дороги нарушение и уничтожение растительного покрова на значительных площадях почти неизбежно. При этом смыв на таких участках оказывается примерно таким же, как со строительных площадок в городах, т. е. достигает 100—500 т/га·год.

Значительный вынос материала эоловым путем и плоскостной эрозией происходит и с эксплуатируемых дорожных насыпей. Так, М. Хайх измерял механический снос с южного склона дорожной насыпи одной из автомагистралей в штате Оклахома (США). Насыпь, сложенная рыхлыми песчаниками и продуктами их выветривания и имеющая высоту 3 м при крутизне 30°, ежегодно теряла 492—556 т/га обломочного материала. В основном снос осуществляется летом ливневыми потоками.

Снос обломочного материала резко ускоряется и при нарушении автотранспортом растительного покрова и почв на

природных формах рельефа. В североамериканской пустыне Молаве использование в качестве дороги гряды, сложенной осадочными породами, привело к сносу с нее ливнями и ветром от 0,2 до 0,4 т грунта с каждого квадратного метра.

Рассеивание загрязняющих веществ с автомагистралей приводит к угнетению растительного покрова, миграции их с поверхностными и подземными водами, отчего качество вод значительно ухудшается.

Угнетающее воздействие на растительность оказывают как осаждение на ней пыли и газов, так и загрязнение почвы. Последнее приводит к ослаблению внутрипочвенных биологических процессов, отрицательно сказывается на функционировании корневой системы растений. Значительная часть соединений свинца, загрязняющего почву придорожных полос, накапливается в растениях, попадая в них через корни. Концентрация свинца в растениях в зоне загрязнения автомагистралей может превосходить фоновую в 50—60 раз.

Отрицательно сказывается на состоянии придорожной растительности загрязнение почвы хлористыми кальцием и натрием, которые, как указывалось, применяются в качестве противогололедных средств.

Резюмируя сведения об экзодинамическом эффекте автодорог, можно сделать вывод, что на стадии строительства, а иногда и ремонтных работ в зонах дорог существенно активизируются процессы механического сноса. В стадии эксплуатации дороги являются поставщиками загрязняющих веществ, влияющих на состояние почв, водных объектов и биоты.

Железные дороги

Строительство зеленых дорог связано с большими нарушениями природной среды, чем при создании автодорог. До 1963 г. прокладка 1285 тыс. км железнодорожных путей сопровождалась земляными работами, объем которых примерно оценен в 28 270 млн. м³ [40]. В настоящее время протяженность железных дорог в мире достигла более 1,3 млн. км, из них в СССР в 1978 г. эксплуатировалось 228, а в США 320 тыс. км.

«Стройкой века» является Байкало-Амурская железнодорожная магистраль. По охвату вновь осваиваемых территорий с ней может сравниться из созданных в последнее время лишь Трансамазонская автострада.

Трасса БАМа без ответвлений имеет протяженность 3200 км. Она начинается от Усть-Кута (Иркутская область) и заканчивается в Комсомольске-на-Амуре (Хабаровский край). Восточнее Иркутской области БАМ последовательно пересекает северные части Бурятской АССР, Читинской и Амурской областей. В Тынде от трассы отходят южное и северное ответвления. Их

длина соответственно 180 и 217 км. Южное ответвление Тында — пос. Бам соединяет трассу с Транссибирской железной дорогой. Железнодорожный путь, отходящий на север, пересекает границу Амурской области и доходит до Беркакита, находящегося на юге Якутской АССР.

БАМ характеризуется уникальными инженерно-геологическими условиями. Почти вся западная половина трассы приурочена к зоне высокой сейсмичности с изосейстами от 7 до 10 баллов. Многолетнемерзлые породы в пределах полосы трассы распространены гораздо шире, чем породы, имеющие положительные температуры. В составе многолетнемерзлых пород большую роль играют высокольдистые, с содержанием подземного льда до 70—80 %. Сели, лавины, оползни, курумы, солифлюкционные сплывы, наледи и термокарст крайне осложняют строительство железной дороги и эксплуатацию готовых ее участков.

Благодаря высокой технической оснащенности строительство ведется ускоренными темпами. Как сообщает В. Л. Калинин, в 1978 г. объем земляных работ составил 45 млн. м³. Подготовлено под укладку около 500 км земляного полотна. Сооружено 350 км главного пути, построено 270 мостов и труб, пройдено около 2000 м туннелей и 2500 м транспортно-дренажных штолен. Всего с начала строительства уложено свыше 1600 км железнодорожного пути, построено более 2500 км автодорог, 750 больших и средних мостов, в том числе через такие крупные реки, как Амур, Амгунь, Гилюй, Киренга, Лена. В очень сложных условиях построено 6 км туннелей.

Отдельные участки БАМа уже эксплуатируются. В частности, уже два года осуществляется регулярное движение поездов на участке пос. Бам — Тында. Совсем скоро Байкало-Амурская железная дорога позволит освоить и преобразить громадный по площади регион к северу от Транссибирской магистрали.

Изменение процессов механического сноса и аккумуляции в зонах железнодорожного строительства во многом сходно с тем, что имеет место при создании автострад.

Специфическим является рассеивание загрязняющих веществ. В зонах железных дорог происходит распыление железа, окислы и гидроокислы которого накапливаются в почве поблизости от них. Однако характер воздействия техногенного ожелезнения на биологические процессы остается не ясным. Зато очевидный и очень ощутимый негативный эффект на почвенно-растительный покров оказывают потери нефти и нефтепродуктов. Согласно В. К. Бешкету, они возникают в результате следующих явлений: 1) интенсивного испарения при наливе, сливе и в процессе перевозки; 2) утечки из-за неплотности между котлом цистерны и наливными и сливными устройствами и 3) при сбросе неутрализованных остатков груза в пунктах очистки недослитых цистерн. О размерах таких потерь можно судить по данным табл. 37.

Средние и максимальные потери нефти на одну четырехосную цистерну
(по В. К. Бешкету)

Операция	Потери на одну цистерну, кг		Операция	Потери на одну цистерну, кг	
	средние	максимальные		средние	максимальные
Налив	20	40	Слив	25	50
Перевозка (48 ч)	245	1030	Очистка	359	1200

Большие путевые потери наливных грузов при перевозке, как это видно из табл. 37, во многом объясняются несовершенством конструкций цистерн и неудовлетворительным состоянием крышек колпаков и сливных приборов.

Помимо нефти и нефтепродуктов в полосах железных дорог рассеиваются мелкие фракции каменного угля, концентратов руд черных и цветных металлов, торфа и других сыпучих грузов, перевозимых на открытых платформах. В. К. Бешкет оценивает рассеивание пыли только от потерь перевозимых грузов на железных дорогах СССР в 20 млн. т в год, что составляет почти 900 т на 1 км железнодорожного полотна. Основная масса твердых частиц рассеивается в полосе шириной примерно 0,5 км, и, таким образом, модуль антропогенной золовой аккумуляции в зонах железных дорог составляет 18 т/га·год. Эксплуатация железнодорожных путей, так же как и автодорог, неизбежно связана с антропогенным рассеиванием и аккумуляцией вещества вокруг них.

Магистральные трубопроводы

Высокой экономической эффективностью магистральных трубопроводов как средства транспорта топлива, сырья и других материалов на большие расстояния объясняется их ускоренное строительство, в особенности в развитых странах. Помимо трубопроводов, транспортирующих жидкие и газообразные вещества, уже построены и эксплуатируются трубопроводы протяженностью более 500 км, по которым подаются к месту назначения измельченный каменный уголь, руды и рудные концентраты, известняк, фосфаты, порошкообразные пластмассы, сера, строительные материалы, песок, гравий, отходы производства и т. п. Ведутся исследования по созданию трубопроводов, по которым бы перемещались капсулы с пассажирами.

В 1975 г. общая длина нефтепроводов, нефтепродуктопроводов и газопроводов во всех странах мира превысила 1,7 млн. км. Ежегодный прирост длины магистральных трубопроводов оценивается в несколько десятков тысяч километров.

По данным Э. М. Блейхера и соавторов, к началу 1979 г. протяженность магистральных трубопроводов для транспортирования нефти, нефтепродуктов и газа достигла в СССР примерно 165 тыс. км. Строительство магистральных трубопроводов ведется опережающими добычу темпами; они обеспечивают транспортирование свыше двух третей топлива страны.

Антропогенные процессы - мероприятия. В комплексе работ по подготовке строительной полосы вдоль трассы будущего магистрального трубопровода входят валка леса, корчевка пней и кустарников, удаление крупных камней, срезка бугров и засыпка впадин землей, сооружение полок на склонах, возведение насыпей на болотах и т. д. Далее прокладывается траншея, в нее помещаются трубы (после нанесения на них специального антикоррозийного состава), затем производится сварка труб и засыпка траншеи. Прокладка труб при необходимости осуществляется без рытья сплошной траншеи методом прокола грунта. Это делается, например, при их прокладке под железнодорожной насыпью.

На обводненных и заболоченных участках могут быть применены все три вида укладки трубопроводов: 1) подземная укладка на минеральное дно болота или на торфяное, или свайное основание; 2) наземная укладка непосредственно на поверхность болота с обваловыванием местным торфяным грунтом или в насыпи из минерального грунта и 3) надземная укладка на опорах. Водные объекты обычно пересекаются трубопроводами по дну. Под водой трубы нередко укладываются в две или более нитки на случай аварий.

В условиях криолитозоны также применяются все три вида укладки. Как указывают А. К. Дерцакян и Н. П. Васильев, при подземной укладке в многолетнемерзлых породах трубы помещаются на теплоизоляционный экран там, где грунты отличаются высокой просадочностью. Наземная укладка может производиться с теплоизоляционным слоем и без него. Для сооружения теплоизоляционных подсыпок и обваловывания газопроводов, как правило, используются песчаные грунты, реже глинистые.

Трубопровод оказывает незначительное давление на грунт. Поэтому осадка трубопровода обусловлена осадкой оттаявшего грунта и зависит только от свойств грунта и теплового воздействия трубопровода на грунт — зоны оттаивания грунта под трубой. Если оттаивают погребенные льды или сильнольдистые грунты, то трубы могут «тонуть» в оттаивающем основании, вовлекая в зону оттаивания новые слои грунта.

На грунтах с очень высокой просадочностью применяется надземная прокладка труб на деревянных, стальных или даже земляных опорах. Например, большая часть газопровода Мессо-Сояха — Норильск построена надземным способом.

В криолитозоне строительство магистральных трубопроводов сопряжено с проведением целого комплекса мер, направленных на то, чтобы до минимума свести негативные последствия от строительных работ и эксплуатации таких сооружений. В 1977 г. был построен Трансаляскинский нефтепровод, сооружение которого, как указывает Н. А. Граве, было примером практического выполнения требований по охране среды. Нефтепровод пересекает Аляску с севера на юг и имеет протяженность 1287 км. Он проходит по тундре, через три горных хребта с ледниками и лавинами, сейсмическую зону до 8,5 баллов, пересекает 380 рек и ручьев.

Более 500 км трассы находится в области распространения многолетнемерзлых пород. Здесь строительство нефтепровода, дорог, а также обустройство месторождений производилось в зимнее время. Трубопровод укреплен на стальных сваях, замороженных в грунт. Стабильность сильнольдистых грунтов поддерживается специальными охлаждающими установками.

На территории с островной мерзлотой и на лавиноопасных участках трубы заглублены в грунт на 3 м и подстилаются «подушкой» из гравия и щебня. Применены дренаж и дополнительная теплоизоляция. Сильнольдистые участки обойдены трассой. В сейсмических районах нефтепровод помещен на опоры с плавающими устройствами.

Вдоль нефтепровода методом «отсыпки от себя» построены дороги для технического обслуживания и транспортировки грузов. Строительство самого нефтепровода осуществлялось при наличии готовых дорог. При его сооружении было учтено положение путей миграции животных и устроены соответствующие проходы для них. Производится рекультивация нарушенных участков и очистка загрязненных поверхностных вод. На расстоянии 5 км по обе стороны от трассы нефтепровода запрещена всякая охота. За состоянием трассы и прилегающих к ней участков ведется наблюдение.

В период строительства нефтепровода имели место случаи разрыва труб при их испытании, всплывания труб, заглубленных в грунт. Тем не менее, нефтепровод безаварийно эксплуатировался два года. Однако в июне 1979 г. во время ледохода и снеготаяния произошли два крупных разрыва труб — в горах севернее г. Валдес и в бассейне р. Атигун.

К антропогенным процессам-следствиям, возникающим при строительстве и эксплуатации магистральных трубопроводов, можно отнести: 1) некоторые виды механического сдвижения грунтов вследствие подрезки склонов или давления конструкции (обвалы, осыпи, оползни-оскользны, осадка); 2) образование ореолов протаивания вокруг трубы или ореолов промерзания в случаях, когда транспортируемые вещества соответственно имеют положительную и отрицательную температуры. Согласно П. Р. Ривкину и соавторам, при перекачке «горячих» и «теп-

лых» нефтей тепловое воздействие нефтепровода оказывается очень значительным. Например, при температуре нефти $+80^{\circ}\text{C}$, подаваемой по трубопроводу диаметром 1220 мм, глубина ареала протаивания может достигать 7—8 м за первый год и 15 м за 20 лет эксплуатации. При этом просадка грунта может оказаться вполне достаточной для разрыва трубопровода; 3) выбросы загрязняющих веществ при авариях.

Подавление биологических процессов при загрязнении почвы нефтью при авариях и поврежденных на линейной части нефтепроводов или при аварийных утечках из оборудования нефтеперекачивающих станций представляет собой стойкое и трудно поправимое явление. Одна из причин этого — вытеснение из почвенных пор кислорода, необходимого для роста корней. Участки, где нефть пропитала почву до глубины в несколько десятков сантиметров, оказываются непригодными для растительности в течение нескольких лет. Если количество пролитой нефти превышает тот объем, который способна удержать почва, то может произойти нефтяное загрязнение подземных вод.

Природно-антропогенные процессы в зонах магистральных трубопроводов отличаются большим разнообразием. Размыв и дефляция грунтов, перемещаемых и обнажаемых механизмами, и аккумуляция удаляемого вещества активно протекают в период строительства магистральных трубопроводов и быстро затухают с его окончанием в районах с гумидным климатом. В криолитозоне нарушение почв и растительности и изменение термического режима приводит к развитию целого комплекса природно-антропогенных процессов, которые могут стать причиной аварий на самом сооружении.

В очень сложных условиях, как уже указывалось, построен газопровод Мессояха—Норильск. Сведения об экзодинамических процессах, возникших на этой трассе, приведены в работе С. А. Замолотчиковой с соавторами. Полоса трассы находится в пределах Приенисейской равнины с абсолютными отметками 80—120 м. В долинах крупных рек (абсолютные отметки менее 30 м) прослеживаются низкая и высокая поймы, а также две надпойменные террасы.

При строительстве газопровода расчищена от растительности полоса шириной 20—70 м и реже до 100 м. Вырублен лес и кустарник, уничтожен травяной и моховой покровы. Поэтому нарушены условия накопления снега, а в связи с планировкой полосы изменился микрорельеф, условия стока поверхностных и надмерзлотных вод, полностью или частично осушены некоторые озера.

Труба газопровода диаметром 0,7 м на большей части водораздельных пространств и при пересечении небольших долин уложена на свайные основания. Лишь на отдельных водораздельных участках она расположена непосредственно на земле. На переходах через долины крупных рек — Енисей, Большой и

Малой Хсты, Норилки — на поймах шириной до 4 км применена подземная прокладка, а в реках — подводная.

Наибольшие изменения температуры грунтов произошли всюду, где была уничтожена растительность. На участках подземной прокладки труба летом оказывает обогревающее, а зимой охлаждающее влияние. Поэтому в таликах на пойме происходит многолетнее промерзание пород. То же имеет место и на головных участках подводных переходов. При большой ширине реки (Енисей — 2,5 км) труба на выходе из нее обогревает породы.

Наземная укладка трубы приводит к существенным нарушениям субстрата. Горизонтальные перемещения трубы за счет температурных деформаций приводят к частичному или полному уничтожению напочвенного покрова, особенно на сильно изогнутых участках трубы. Полоса нарушения при этом может достигать ширины более 5—7 м. Труба существенно влияет на динамику накопления и схода снежного покрова.

Прокладка трубы на сваях обеспечивает ее минимальное тепловое воздействие. В целом же преобладает охлаждающее воздействие трубы на грунт. Понижение температуры и новообразование многолетнемерзлых пород при укладке трубы в траншею в талики способствует усилению пучения пород, которое особенно неравномерно на границе таликов и массивов многолетнемерзлых пород. Осенью после промерзания слоя сезонного оттаивания труба защемляется в мерзлом массиве, а в талике вследствие многолетнего промерзания пород всю зиму продолжается их пучение. Это, наряду со спецификой температурных и других деформаций самой трубы, нередко приводит к ее разрыву.

Большие температурные перепады, которые создаются в течение года на трассе, обеспечивают в преобладающем количестве случаев увеличение глубины сезонного протаявания грунтов на трассе, а это способствует активизации процессов термокарста, пучения на ровных участках и термокарста, солифлюкции и термоэрозии на склонах. Р. П. Щелкунова сообщает, что в полосе газопровода растительный покров оказался нарушенным на площади 70 тыс. га, из которых 26,8 тыс. га являются ценными зимними и ранневесенними оленьими пастбищами. Ширина нарушенной зоны колеблется от 0,3 до 4,5 км и в среднем составляет 2 км. Уничтожение мохово-лишайникового покрова привело к дополнительному протаяванию грунта на величину от 18 до 27 см. Образовались просадочные формы рельефа, в тундрах появились озерки, провалы, ямы с водой, эродированные участки, развеваемые пески. Таким образом, строительство и эксплуатация магистральных трубопроводов в криолитозоне приводит к значительным изменениям природных экзодинамических процессов. В отдельных случаях эти изменения оказываются достаточно однонаправленными и устойчивыми.

В настоящее время строительство и эксплуатация магистральных трубопроводов оказываются тесно сопряженными с работами по рекультивации нарушенных земель в зонах этих линейных сооружений.

На основании вышесказанного можно заключить:

1. Строительство линейных сооружений, которые захватывают все большие площади суши и дна акваторий, активизирует механический снос всюду, где оно ведется с применением большого объема земляных работ и сопровождается нарушением почвенно-растительного слоя на прилегающих пространствах.

2. Эксплуатация дорог и трубопроводов приводит к рассеиванию вещества и энергии, что по-разному отражается на функционировании вмещающих из ПЭК.

3. Сохранение динамического равновесия между линейными сооружениями и окружающей средой возможно только на основе постоянного контроля над их взаимодействием.

ВОЕННЫЕ ДЕЙСТВИЯ

При военных действиях, учениях или испытаниях оружия осуществляется очень интенсивное, местами массивное изменение земной коры.

Антропогенные процессы

Военными процессами-мероприятиями, по-видимому, можно считать: 1) движение войск, их временное и стационарное размещения; 2) создание в земной коре различных защитных объектов (окопов, блиндажей, противотанковых рвов и др.); 3) действия по уничтожению противника, его защитных объектов, военной техники, а также всего, на чем непосредственно основывается его военный потенциал. Следует отметить, что среди уничтожаемых защитных объектов, наряду с инженерными, оказывались и некоторые природные: леса, пещеры, бугры и др.

Движение войск вне дорог приводит к значительному разрушению почвенно-растительного покрова. Особенно велик этот эффект в районах Крайнего Севера, пустынях и полупустынях.

Рытье различных защитных объектов приводит к изменению рельефа, образованию искусственных выемок и отвалов. Такого рода действия, осуществленные в периоды минувших двух мировых войн, привели к перемещению грунтов объемом в несколько кубических километров [40].

Действия по уничтожению противника и его объектов являются наиболее пагубными для человека и окружающей среды.

Уничтожение растительного покрова в огромных масштабах было осуществлено в Южном Вьетнаме в течение 1961—

1973 г. армией США и войсками генерала Тхиеу. С 1961 по 1969 г. 43 % пахотных земель и 44 % площади лесов в Южном Вьетнаме было «обработано» пестицидами. Согласно Л. И. Кураковой, лишь за период 1965—1970 гг. было распылено более 50 т ядохимикатов. Сельскохозяйственные угодья и отчасти леса подверглись очень сильному разрушению. Всего за время войны было уничтожено 50 млн. м³ древесины. Во многом благодаря этому, как указывает Б. Сукхвалл, зеленая плодородная земля — житница риса Юго-Восточной Азии — превратилась в разоренную страну с перенаселенными городскими центрами, жалкими лагерями беженцев и опустошенными пространствами.

Очень сильно пострадал растительный покров во Вьетнаме также от взрывов бомб и прямого истребления его бульдозерами.

В 1966 г. военно-воздушные силы США сбросили на Вьетнам 638 тыс. т авиабомб, в результате чего выброс грунта достиг 150 млн. м³. За период 1965—1971 гг. размеры бомбардировок составили 6,2 млн. т авиабомб, что привело к выбросу грунта, в десять раз большему, чем указанный выше [40]. Всего за время войны во Вьетнаме было перемещено взрывами 2,5 млрд. м³ земли. Бомбардировки привели к образованию обширных площадей антропогенного бедленда с воронками глубиной 6—9 м.

Во время бомбардировок в результате взрыва возникает ударная волна, которая нарушает однородность почвенного покрова, убивает фауну, почвенные микроорганизмы, разрушает растительность. Согласно А. Вестигу, каждый килограмм взрывчатого вещества обычной бомбы вызывает разрушение экосистемы на площади 12,5 м². От бомбы массой 250 кг образуется воронка, из которой выбрасывается 70 м³ почвы. 1 кг взрывчатого вещества бомбы, взрывающейся в воздухе низко над целью, полностью уничтожает растительный покров на площади 10 м². Зажигательное оружие вызывает пожары: 1 кг напалма полностью сжигает все на площади 6 м².

Влияние ударной волны или пожара на экосистему при ядерном взрыве отличается от аналогичного эффекта обычного оружия только масштабами. О том, какое воздействие оказывает применение ядерных бомб на природную среду, можно судить по следующим данным (табл. 38).

После взрыва 10—15 % всей радиации остается нерассеянной и создает хронический стресс на экосистемы (иногда в форме радиоактивных осадков). Особую опасность представляют стронций-90, цезий-137, углерод-14, тритий и железо-55. За исключением углерода-14, все эти радиоактивные вещества накапливаются в почве и из нее могут попадать в растения и животных.

К косвенным последствиям относится поступление огромных масс пыли в атмосферу. При взрыве одной мегатонны тринитро-

Влияние наземного ядерного устройства на отдельные компоненты экосистемы
(по А. Вестигу)

Характер поражения	Площадь поражения, га *	
	Атомная бомба 20 кт	Водородная бомба 10 Мт
Взрывная воронка	1	57
Гибель позвоночных от ударной волны	24	1 540
Уничтожение растительности в результате ионизирующего излучения	43	12 100
Уничтожение древесной растительности в результате ионизирующего излучения	148	63 800
Уничтожение растительности ударной волной	362	52 500
Гибель позвоночных в результате ионизирующего излучения	674	117 000
Уничтожение растительности в результате теплового излучения	749	177 000
Гибель позвоночных в результате теплового излучения	1000	150 000

* Поражение ионизирующей радиацией рассчитано на 24-часовой период.

толуола образуется 10 тыс. т пыли. Кроме того, поступление в атмосферу больших количеств окиси азота (10 тыс. т на мегатонну взрывчатых веществ) может привести к распаду озонового экрана.

При взрывах изменяются свойства не только выброшенных, но и оставшихся на месте грунтов. Глинистые породы в стенках воронок существенно деформируются, что часто приводит к их уплотнению и увеличению прочности. Возрастание плотности грунтов глинистого состава после взрыва иногда достигает 20 % и более.

Экспериментальное изучение влияния действия взрыва заряда аммонита массой 55 кг, специально помещенного в грунт на глубину 1,6 м, дало следующие результаты: объемная масса суглинки, залегающего на 2,0—2,7 м ниже центра заряда, увеличилась на 7—8 %, а пористость и влажность уменьшились соответственно на 8 и 11 % [40].

При нарушении взрывами скальные грунты разрушаются на куски главным образом по трещинам-отдельностям. Взрывы атомных и водородных бомб вызывают оплавление пород. А подземные взрывы, по данным Ю. Шубера, приводят к образованию камер вследствие того, что горные породы в месте

взрыва превращаются в газ. Вокруг камеры взрыва скальные породы оказываются совершенно перетертыми и дальше растресканными.

Вышеизложенные данные показывают, что результатами военных мероприятий являются: 1) нарушение и уничтожение почвенно-растительного покрова; 2) видоизменение рельефа; 3) преобразование свойств горных пород, подвергшихся непосредственному воздействию взрывов или перемещенных при земляных работах; 4) разрушение различных антропогенных объектов; 5) загрязнение воздуха, поверхностных и подземных вод, а также почвы пылью, радиоактивными веществами, ядохимикатами и др.

Природно-антропогенные процессы

Нарушения, вызываемые в поверхностной части земной коры военными действиями, служат причиной развития многих природно-антропогенных процессов. Однако сведения о них весьма отрывочны.

Так, согласно Л. И. Кураковой, в Южном Вьетнаме нарушения, вызванные дефолиацией и бомбардировками, привели к жесточайшей эрозии почв, развитию оползней, увеличению мутности водотоков, усилению наводнений, выщелачиванию питательных веществ из почв и их истощению.

В результате военных действий в пустынях Северной Африки во вторую мировую войну из-за сильного нарушения почвенно-растительного слоя в несколько раз возросло количество пыльных бурь. В 1941 и 1942 гг. в Северном Египте наблюдались соответственно 40 и 50 пыльных бурь, а в 1944—1945 гг. число бурь упало до 11, что объясняется быстрым восстановлением растительного покрова [25].

ЭФФЕКТ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОТДЕЛЬНЫЕ ПЭС И ЭКЗОДИНАМИКУ СУШИ В ЦЕЛОМ

В настоящее время все типы ПЭС подвергаются антропогенному воздействию. Можно с уверенностью сказать, что на большей части площади неледниковой суши функционируют измененные человеком природно-антропогенные экзодинамические системы (ПАЭС) и комплексы (ПАЭК). Важнейшей отличительной особенностью ПАЭС и ПАЭК является действие внутри них антропогенных и природно-антропогенных экзодинамических процессов. Всестороннее изучение ПАЭС и ПАЭК суши — большая самостоятельная задача, имеющая огромное практическое и научное значение. В книге эта проблема затронута лишь для того, чтобы показать, какими бывают конкретные результаты антропогенной трансформации различных ПЭС.

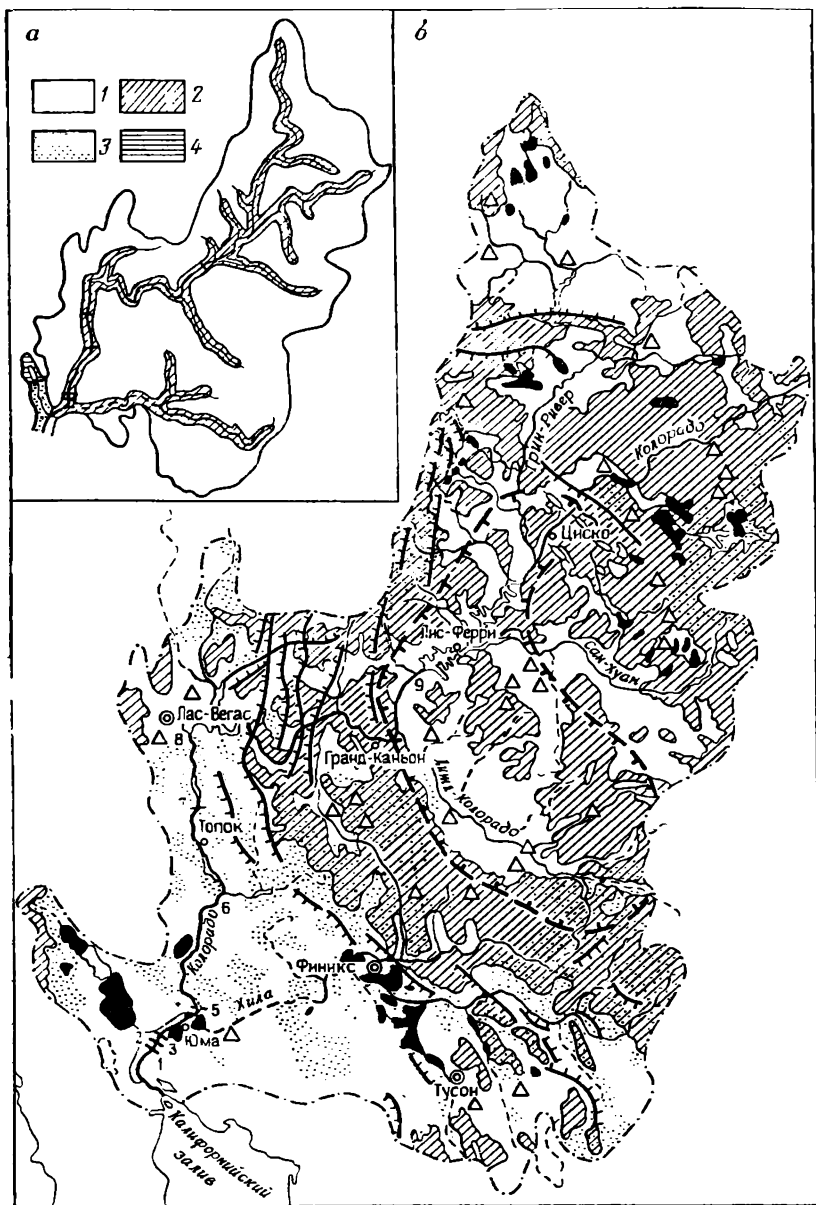
БАССЕЙНОВО-РЕЧНАЯ ПАЭС р. КОЛОРАДО (С КАСКАДОМ ВОДОХРАНИЛИЩ)

Данные о функционировании названной ПАЭС и об этапах ее развития интересны прежде всего с практической точки зрения, так как дают представление об экологических проблемах, возникающих при экстенсивном хозяйственном использовании аридных территорий.

Бассейн р. Колорадо по характеру природных условий может быть отнесен к подтипу горных бассейново-речных ПЭС. Площадь бассейна 637 тыс. км², из которых 632 тыс. км² относятся к территории США и 5 тыс. км² — к Мексике. Основную часть питания река получает в пределах плато Колорадо, поверхность которого расположена на высотах 2—3 км, а отдельные хребты и горные массивы внутри плато и по его краям достигают 3—4 км. Долинной сети свойственны большие уклоны и врез в плато на глубину до 1—1,5 км, а иногда и более. Большой Каньон р. Колорадо протяженностью почти 800 км достигает глубины 1,8 км при ширине 8—20 км на уровне поверхности плато и всего несколько сотен метров (местами 90—100 м) у уреза воды.

Плато Колорадо и его северное и восточное обрамления представляют собой обособленную глыбу платформенной коры мощностью 40 км, граничащую со складчатым сооружением Кордильер. В разрезе плато присутствуют образования всех групп.

Большую роль в структуре плато играют разломы и флексуры. В строении осадочного чехла наряду с обычными поло-



гимн платформенными складками и моноклиналями существенное значение имеют соленосные антиклинальные структуры, которые являются важным источником поступления минеральных веществ в р. Колорадо.

Климат плато Колорадо континентальный, семиаридный и аридный. В верховьях реки на наиболее приподнятых участках (Гранд-Меса, вершины горы Юинта и Скалистых гор) в пределах пояса альпийских лугов выпадает от 1000 до 1250 мм осадков в год. Ниже количество осадков постепенно снижается от 1000 мм в лесном поясе до 250 мм у нижней границы сосново-можжевельновых редколесий. В интервале высот 1000—1500 м и ниже, где выпадает 150—250 мм осадков в год, участки плато, склоны и днища долин покрыты разреженной травянисто-кустарниковой полупустынной и пустынной растительностью. Максимум осадков в горах северо-восточной части бассейна приходится на зимнее время года, весной наблюдаются бурные паводки. Эта территория дает до 85 % общего стока р. Колорадо. Южную часть бассейна занимают субтропические и тропические пустыни, общая площадь которых составляет 16 400 тыс. га, или 24 % площади бассейна р. Колорадо.

Природные условия бассейна р. Колорадо обеспечивают преобладание в его пределах водосборных ПЭК планации (рис. 15). В такой обстановке антропогенная нагрузка приводит к быстрому расшатыванию и без того недостаточно стабильной ПЭС. Эволюцию ПАЭС р. Колорадо можно разделить на два крупных этапа. Первый (вторая половина XIX в.—середина 30-х годов XX в.) характеризовался непомерной в основном пастбищной нагрузкой на водосборные ПАЭК и в сравнении с нею относительно меньшим прямым воздействием на долинный ПАЭК. В 1922 г. пастбища занимали около 80 % общей площади ПАЭС, а орошаемые земли, в значительной мере приуроченные к днищам крупных долин,— 1,7 %. Ускоренная эрозия и дефляция, по-видимому, буквально терзали пастбищные земли. Разрушение почвенного покрова на них происходило по крайней мере в несколько десятков раз быстрее, чем в природных условиях. Это было время самого высокого твердого стока р. Колорадо за исторический период (табл. 39 и 40).

Рис. 15. Бассейново-речная ПАЭС р. Колорадо:

а — местоположение водосборных (1), долинных (2) и дельтовых (3) ПАЭК; 4 — бессточное-озерная ПАЭС Солтон-Сит; 5 — схема условий формирования минерального стока р. Колорадо. Площади повышенного сноса минерального материала: 1 — распространение осадочных пород с разреженной растительностью; 2 — крупнейшие зоны разломов и дробления пород; 3 — соленосные антиклинальные структуры; 4 — орошаемые земли; 5 — крупнейшие урбанизированные территории; 6 — территории, нарушенные горными разработками. Площади более ограниченного сноса минерального материала: 7 — распространения осадочных пород с лесной и сомкнутой травянистой растительностью; 8 — распространения прочных магматических и метаморфических пород; 9 — граница области с максимальной мутностью водотоков (от 15 г/л и более); 10 — граница ПАЭС. Крупнейшие плотины: 1 — Калеана; 2 — Матаморос; 3 — Морелос; 4 — Лагуна; 5 — Импернал; 6 — им. Паркера; 7 — им. Дэвиса; 8 — им. Гувера; 9 — Глен-Каньон

Речной (1, км³/год), твердый (2, млн. т/год) и ионный (3, млн. т/год) стоки р. Колорадо до создания водохранилищ (1926—1930 гг.). По Т. И. Кондратьевой и С. П. Горшкову

Местоположение станции	Сток в годы наблюдений														
	1926			1927			1928			1929			1930		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
г. Циско	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,5	—	—	5,3	7,5	17,0
г. Лис-Ферри	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23,7	319,0	—	12,3	16,2	176,0
г. Гранд-Каньон	17,8	204,0	9,3	21,4	360,0	12,2	19,3	156,0	9,5	23,9	435,0	—	13,3	16,5	213,0
г. Толлок	17,7	127,0	9,6	21,0	313,0	12,8	18,5	189,0	—	23,3	396,0	—	—	16,3	222,0
г. Юма	16,4	137,0	—	19,8	218,0	12,1	17,2	116,0	8,8	22,0	237,0	—	—	15,4	163,0

Таблица 40

Речной (1, км³/год), твердый (2, млн. т/год) и ионный (3, млн. т/год) стоки р. Колорадо после создания каскада водохранилищ (1966—1970 гг.). По Т. И. Кондратьевой и С. П. Горшкову

Местоположение станции	Сток в годы наблюдений														
	1966			1967			1968			1969			1970		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
г. Циско	4,3	—	—	3,7	8,4	3,3	5,0	10,4	3,3	5,9	8,5	4,7	7,2	8,4	5,2
г. Лис-Ферри	9,7	—	—	9,6	—	5,8	10,3	—	6,8	10,9	—	6,8	10,7	35,6	6,4
г. Гранд-Каньон	10,3	—	—	10,2	23,3	6,8	11,0	—	7,7	11,5	13,1	7,8	11,3	52,7	7,6
Ниже плотины Гувер	9,6	—	—	9,7	—	6,6	9,7	—	6,7	9,9	—	7,3	9,8	—	7,5
Ниже плотины Дэвис	9,8	—	—	9,8	—	5,7	9,7	—	5,5	9,8	—	—	9,9	—	7,5
Ниже плотины Паркер	8,1	0,7	—	7,9	1,4	—	7,9	2,0	—	8,0	1,1	—	8,1	1,2	6,3
У плотины Имперриал	7,1	0,9	—	7,1	0,7	—	6,9	0,7	—	7,0	0,8	—	6,9	0,9	6,4
У северной границы с Мексикой	1,9	0,9	—	1,6	—	—	1,6	—	—	1,6	—	1,7	1,6	—	1,9

Огромные масштабы дигрессии пастбищ и резкое ухудшение качества воды в бассейне р. Колорадо больно ударило по сельскохозяйственному производству, причем подобная картина наблюдалась и в других районах США с аналогичными природными условиями. Поэтому в 1934 г. в США был принят закон Тейлора об ограничении выпаса, и его внедрение стало, в частности, поворотной вехой в функционировании ПАЭС р. Колорадо.

Второй этап в развитии ПАЭС р. Колорадо (1936 г.— до нынешнего времени) характеризуется ростом нагрузки на долинный ПАЭК главным образом в связи с образованием каскада водохранилищ и определенным снижением (после 1940 г.) давления на водосборные ПАЭК в результате проведения почвоохранных мер и установления контроля над выпасом.

В настоящее время хозяйственная нагрузка на ПАЭС р. Колорадо в целом также весьма высока.

О масштабах антропогенных и природных антропогенных процессов в пределах ПАЭС р. Колорадо можно судить по сведениям об использовании земель. В настоящее время на этой территории расположено более 1160 тыс. га орошаемых земель. Около 80 % площади бассейна продолжает находиться под выпасом, причем в Нижнем бассейне пастбищными являются все категории земель, за исключением национальных парков и урбанизированных территорий. Последние, наряду с небольшими городами, представлены городскими застройками Финикса, Тусона и Лас-Вегаса. Канализации каждого из этих городов ежегодно сбрасывают в р. Колорадо до 50 млн. м³ сточных вод с высоким содержанием твердых частиц и растворенных соединений. Около 25 тыс. га нарушено открытыми разработками полезных ископаемых. В пяти штатах, на территории которых расположен бассейн р. Колорадо, рубки ведутся на площади около 8100 тыс. га, что в среднем составляет 22 % всей площади лесов и 6 % суммарной площади штатов. Под ежегодными выборочными рубками в бассейне реки занято около 3800 тыс. га. Кроме того, ежегодно лесные пожары уничтожают лес на площади от 10 до 25 тыс. га. Эрозия почвы в пределах гарей, занимающих горные территории, в последующие годы отличается особой интенсивностью. И все же современная антропогенная нагрузка на водосборы ПЭК бассейна р. Колорадо не так высока, как в период конца XIX в.— первых четырех десятилетий XX в. Об этом свидетельствует уменьшение механического сноса в пределах ПАЭС.

При примерно одинаковом расходе воды в створах гидростов Циско и Гранд-Кансон твердый сток р. Колорадо в период внедрения программы охраны земель от эрозии и ликвидации перевыпаса (1942—1962 гг.) снизился примерно вдвое—соответственно до 8,7 и 86,4 млн. т/год. В период 1926—

1941 г. его средние величины в указанных пунктах были соответственно 17,3 и 177,3 млрд. т/год.

Полное зарегулирование речного стока р. Колорадо привело к тому, что постоянный сток этой реки в Калифорнийский залив прекратился. Лишь при сильных ливнях в нижней части бассейна в приустьевом отрезке реки появляется вода и в залив поступает до 0,06 км³ воды в год, т. е. 0,3 % ее былого стока.

Расходование 99,7 % колорадской воды внутри ее бассейна и частично в результате межбассейновых перебросок, в частности в такие города, как Лос-Анджелес и Денвер, сейчас строго регламентировано и осуществляется следующим образом. Штаты верхнего бассейна* реки получают в сумме ~7,7 км³ воды (Юта 1,8; Колорадо 4,0; Вайоминг 1,1; Нью-Мексико 0,8 км³), штаты нижнего бассейна ~9,3 км³ (Аризона 3,5; Невада 0,4; Калифорния 5,4 км³) и Мексика 1,85 км³/год.

Зарегулирование стока р. Колорадо привело к тому, что основная масса наносов стала задерживаться в водохранилищах. Благодаря этому твердый сток р. Колорадо уменьшился на порядок у городов Лис-Ферри и Гранд-Каньон и на один-два порядка ниже плотины Паркер при уменьшении расходов воды в створах этих плотин более чем в два раза. О режиме стока р. Колорадо вблизи створа плотины Паркер до ее зарегулирования можно судить по данным для створа у г. Топок, который находится в 60 км выше по течению реки. Из сравнения данных табл. 39 и 40 видно, что в период до зарегулирования сток р. Колорадо превышал таковой после зарегулирования, а сток взвешенных наносов уменьшился при этом в 100—200 раз.

После введения в эксплуатацию серии водохранилищ в них аккумуляровались почти все наносы, транспортировавшиеся ранее р. Колорадо в Калифорнийский залив. Заметную роль в процессе заиления водохранилищ играет и золотой материал. Ниже плотин — на участках, на которые не распространяется подпор от водохранилищ, — происходит переформирование русла.

Часть наносов, поступающих в нижнее течение р. Колорадо к плотине Имперал, аккумуляруется в отстойниках, из которых наносы удаляются землесосами и складываются. По свидетельству Г. Мозерса и У. Сепрса, за десятилетний период, начиная с 1965 г., из отстойника плотины Лагуна было удалено 6,3 млн. т наносов. Борьба с наносами проводится также на водозаборных сооружениях Мексики: водоотводный канал от плотины Морелос окружен в настоящее время насыпями из извлеченных наносов. Ежегодное заиление канала оценивается К. Анайа в 150 тыс. т. Строительство системы водохранилищ в совокупности с применением ряда инженерных устройств поз-

* Бассейн р. Колорадо разбит на Верхний — выше по течению от г. Лис-Ферри (286 тыс. км²) и Нижний (351 тыс. км²).

волило относительно успешно решать проблему борьбы с наносами.

Огромная антропогенная нагрузка на водные ресурсы ПАЭС р. Колорадо создала трудноразрешимую проблему избыточной минерализации воды. Эволюция стока растворенных веществ р. Колорадо и изменение минерализации ее воды за период с 1926 по 1970 г. были весьма сложными. Если основным поставщиком взвешенных наносов в бассейне р. Колорадо являются воды рек Грин-Ривер и Сан-Хуан, то общая минерализация воды распределяется более равномерно в верхней части бассейна р. Колорадо. У г. Циско в 1929—1930 гг. расход растворенных веществ соответственно равнялся 5,3 и 4,4 млн. т, а у г. Лис-Ферри, где водность р. Колорадо возрастала более чем вдвое, их расход составлял 12,3 и 9,2 млн. т в 1929 и 1930 гг. соответственно, т. е. увеличивался приблизительно в такой же пропорции.

Изменение расходов растворенных веществ ниже по течению можно проследить по данным табл. 39. Они показывают, что ионный сток в нижнем течении реки за этот период незначительно снижался или оставался неизменным, но был несколько больше, чем на участке выше Гранд-Каньона. Ежегодный вынос растворенных соединений в Калифорнийский залив с водами р. Колорадо перед зарегулированием достигал в обычные годы 9—12 млн. т.

Проведение противоэрозийных мероприятий в 1942—1960 гг. и последовавшее в результате их снижение поступления обломочного материала в долину р. Колорадо привело также к тому, что часть поверхностного стока была переведена в подземный. В условиях значительного распространения соленосных отложений в нижних горизонтах пустынных и полупустынных почв это способствовало повышению минерализации воды р. Колорадо.

Более ощутимым этот процесс стал в последние годы из-за уменьшения стока и увеличения загрязнения реки. Резкое ухудшение качества воды объясняется в первую очередь наличием высокоминерализованного возвратного стока с орошаемых угодий. Если перед зарегулированием стока среднегодовая минерализация воды у г. Юма была близка к 500—600 мг/л, то в настоящее время ниже плотины Паркер она приближается к 900 мг/л, а у северной границы с Мексикой доходит до 1050—1150 мг/л.

Подавляющая часть растворенных веществ поступает в р. Колорадо в пределах Верхнего бассейна. Из 10 млн. т растворенных веществ, ежегодно проходящих через створ плотины Гувер, 43—50 % (и даже более) американские специалисты оценивают как фоновое содержание, соответствующее уровню природной минерализации вод. Присутствие другой половины растворенных веществ вызвано загрязнением. Ежегодно с воз-

вратными водами с наиболее крупных орошаемых массивов в реку попадает до 3,2 млн. т растворенных веществ. Среди этих массивов выделяются земли низовий р. Ганисон (1,1 млн. т солей), долины Гранд-Валли (0,6 млн. т), долины притоков р. Грин-Ривер: Прайс, Сан-Рафаел, Дерти-Девил (0,65 млн. т). Всего с орошаемых полей Верхнего бассейна р. Колорадо поступает до 3,7 млн. растворенных соединений. Модуль выноса их колеблется от 0,2 до 18,7 т/га·год.

За счет испарения с поверхности водохранилищ Верхнего бассейна, которое оценивается в 0,37 км³/год, концентрация солей в речных водах повышается дополнительно на 1—1,2 млн. т. Испарение с поверхности водохранилищ Нижнего бассейна составляет 1,1 км³/год.

Значительное количество растворенных веществ поступает в р. Колорадо с городскими сточными водами. Так, из городских канализационных систем г. Лас-Вегас в воды реки сбрасывается до 0,2 млн. т в год растворенных веществ.

Минерализация воды в нижнем течении реки столь высока, что для эффективного использования ее в различных отраслях хозяйства требуется проведение мероприятий по улучшению ее качества. Концентрации солей выше 500 мг/л сказываются отрицательно на урожайности чувствительных к солености сельскохозяйственных культур при их орошении. Превышены также допустимые пределы минерализации воды для целей коммунально-бытового водоснабжения.

По данным Бюро Рекламации, от увеличения минерализации воды в р. Колорадо на 1 % в пределах Нижнего Бассейна убытки водопользователей возрастают на 343 тыс. долларов. Из них 240 тыс. долларов теряет коммунальное хозяйство и промышленность и 103 — сельское хозяйство. Негативный эффект избыточной минерализации вод проявляется, например, в изменениях в городской водопроводной сети. Водонагревательные емкости обрастают солевой коркой и становятся менее эффективными, водопроводные трубы быстрее засоряются и ржавеют. Некоторые отрасли промышленности не могут использовать воду, в составе которой присутствуют ингредиенты, привнесенные с возвратными стоками. Продуктивность сельскохозяйственных культур снижается по мере увеличения минерализации вод, используемых для полива.

Большие убытки водопользователей от повышенной минерализации колорадской воды сделали необходимым заключение соглашения между США и Мексикой, определяющего допустимый уровень минерализации речной воды, поступающей в Мексику. В соответствии с соглашением, из ежегодно передаваемых 1,85 км³ воды 1,68 км³ не должны превышать минерализацию воды у плотины Империял более чем на 80—145 мг/л.

Для выполнения условий договора в США была разработана комплексная программа уменьшения минерализации воды

р. Колорадо, предусматривающая снижение поступления солей из ряда источников естественного и антропогенного происхождения в общей сложности на 1,654 млн. т солей в год. Программа включает в себя мероприятия по изоляции высокоминерализованного стока, очистке его на опреснительных установках, выпариванию рассолов в испарительных прудах, а также повсеместному увеличению эффективности использования воды в сельском хозяйстве (облицовка каналов и создание закрытого дренажа). Предполагается, в частности, что улучшение ирригационных систем может снизить возврат солей с полей примерно на 0,9 млн. т в год. Осуществление всей программы позволит уменьшить среднюю концентрацию растворенных веществ в створе у плотины Империял на 113 мг/л. Чтобы увеличить выпадение слабоминерализованных атмосферных осадков в пределах бассейна в США возобновили (и считают перспективными) эксперименты по увеличению снежных запасов в горах в верховьях реки путем засева облаков иодистым серобромом в зимнее время года.

Эволюция ПАЭС р. Колорадо затронула и ее дельтовую составляющую. Анализ картографических материалов показывает, что в начале XIX в. очертания берегов Калифорнийского залива (бывшего моря Кортеса) были непохожи на современные. В географическом атласе «Новая Испания» Ал. Гумбольдта, вышедшего в свет в 1911 г., северная часть залива вытянута на север вплоть до устья нижнего левого притока Колорадо р. Хила. Если эта картографическая информация верна, то получается, что заполнение северной части Калифорнийского залива наносами и превращение ее в наземную часть дельты р. Колорадо произошло в период заселения и интенсивного стихийного хозяйственного освоения ее бассейна, т. е. главным образом во второй половине XIX в. и в течение первых трех с половиной десятилетий XX в.

Резкий дефицит наносов в устье р. Колорадо, возникший с 1936 г. в результате образования водохранилища Мид, вызвал, по свидетельству Э. А. Новикова, не только прекращение роста дельты, но и ускоренную абразию берегов в приустьевой части Калифорнийского залива.

Данные о трансформации ПЭС р. Колорадо в природно-антропогенную и эволюция последней свидетельствуют о высокой чувствительности всех подразделений ПАЭС к хозяйственной нагрузке. Функционирование ПАЭС р. Колорадо отличается от действия былой природной системы усложнением перемещения водных масс и содержащихся в них продуктов механического и химического сноса. Под воздействием антропогенного фактора возникли принципиально новые условия мобилизации вещества, пути движения и места его аккумуляции. В частности, наносы р. Колорадо, помимо перехода в состав природно-антропогенных осадков водохранилищ, сейчас извлекаются и накап-

ливаются на суше вблизи ирригационных каналов, отдельных участков русла и специальных отстойников. Соли, формирующие сток растворенных соединений реки, также почти полностью перестали выноситься в океан. Вместо этого они частично задерживаются на орошаемых полях, в системах водоснабжения и др.

Эти факты, а также то, что в отдельные моменты эволюции бассейново-речных ПАЭС р. Колорадо в ее пределах имели место вызванные движения земной коры, ускоренная трансгрессивная эрозия и регрессивная аккумуляция, оседания земной коры при избыточном выкачивании подземных вод — все это говорит о большой специфичности природно-антропогенной геодинамики в условиях высокой и разнообразной хозяйственной нагрузки на земную кору. Многие из того, что мешает хозяйственному использованию природных ресурсов в бассейне р. Колорадо сейчас начинает проявляться и в среднеазиатских районах СССР.

ГРУППА ОЗЕРНЫХ ПАЭС

Всюду, где природные ландшафты преобразованы в антропогенные, на геологической деятельности озер ощутимо сказывается влияние такой трансформации. Вмешиваясь в динамику и меняя мощность природных потоков вещества, питающих озеро, человек, кроме того, создает искусственные потоки. Наиболее обычным является сбрасывание отходов в котловину озера с помощью технических средств как непосредственно с берегов, так и с кораблей. Кроме того, при драгировании дна озер в сферу циркуляции озерных вод нередко попадает материал коренных пород дна и тем самым во время его проведения происходит дополнительная искусственная мобилизация вещества формирующего озерные осадки.

Следует указать и на наличие обратных техногенных потоков вещества, которые имеют место как при разработке полезных ископаемых из озерных осадков (гравий, песок, сапрпель, соли), так и при заборе озерных вод, с которыми выносятся растворенный и тонкий обломочный материал.

Антропогенное изменение экзодинамических процессов в озерах чаще происходит без существенного нарушения уровня воды в них. Однако постепенно растет число озер, геологическая деятельность которых изменена вследствие поднятия их уровня плотинами или, наоборот, из-за его снижения при безвозвратном использовании части водного бюджета. Таким образом, человек опосредственно — путем воздействия на различные звенья бассейново-речных систем, привязанных к озерам, и прямо — в форме гидротехнической, инженерной, горно-добывающей и другой деятельности, влияющей непосредственно на озерную

гидродинамику, может существенно менять и во многих местах уже изменил геологическую деятельность озер.

Хозяйственное освоение крупных озер неизбежно связано со строительством на их берегах населенных пунктов, причалов, берегозащитных сооружений. Кроме того, они широко используются для судоходства, рыбного промысла и рекреационных целей. При освоении и эксплуатации побережий на отдельных участках нарушается растительный покров, меняются характер и расположение поверхностных водотоков, а также деятельность подземных вод.

Изучение многообразных изменений, вызванных хозяйственными мероприятиями в геологической деятельности озер, только начинается, и поэтому в данном разделе рассматривается ограниченное число примеров.

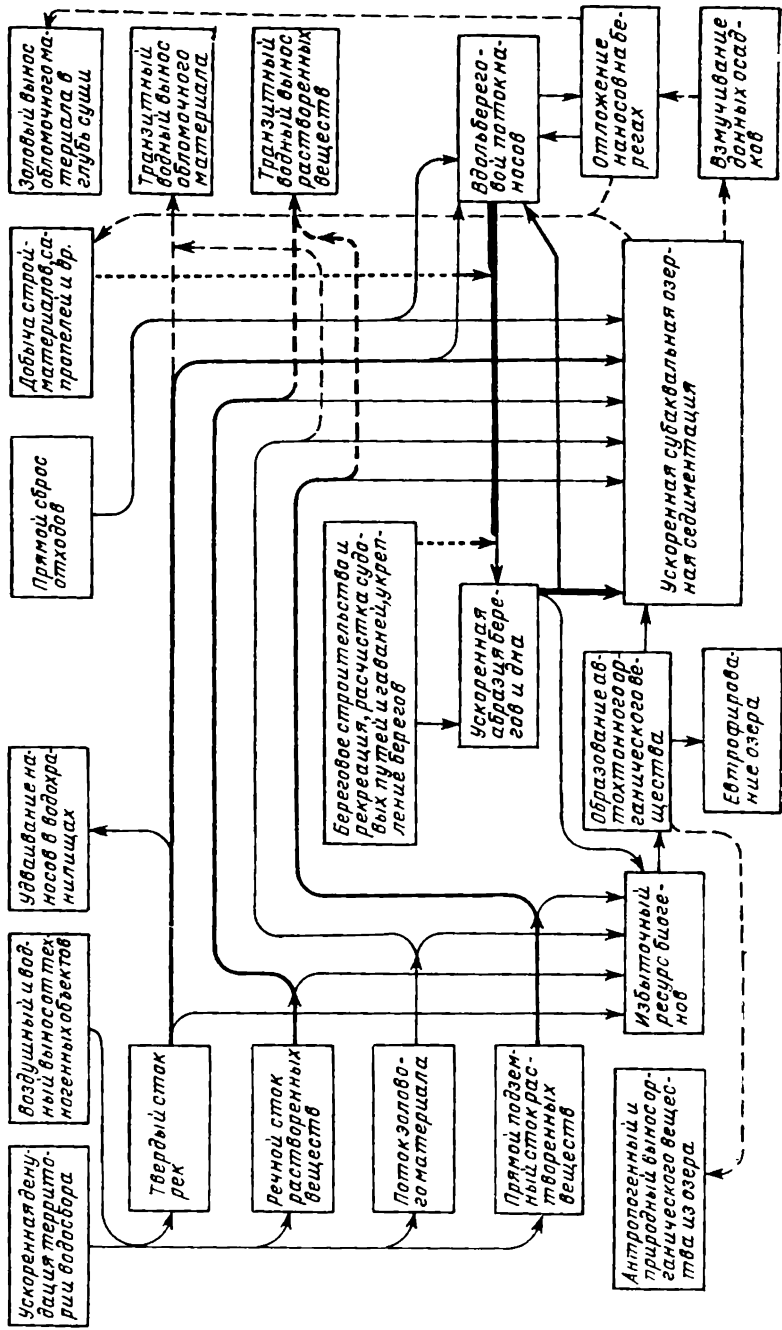
ПРОТОЧНО-ОЗЕРНЫЕ ПАЭС

Благодаря очень большим запасам пресной воды в крупных проточных озерах, их побережья очень удобны для хозяйственного освоения. Изучение крупных озер дает наглядную информацию об антропогенном воздействии на составляющие озерной экзодинамики (рис. 16). Примером функционирования проточно-озерных ПАЭС может служить геологическая деятельность Великих озер. Сведения об особенностях их современной экзодинамики заимствованы из работ Р. Берга, Р. Дэвиса, К. Дэма, А. Кемпа и ряда других.

Котловины Великих озер выработаны в докембрийских кристаллических породах (Верхнее и Гурон) и в толще палеозойских известняков, доломитов и песчаников (Мичиган, Эри и Онтарио). В пределах большей части дна котловин и на значительных участках побережья развиты четвертичные моренные, озерно-ледниковые и флювиогляциальные накопления.

Неровный рельеф дна Великих озер несколько нивелируется послеледниковыми отложениями. Во впадинах озерных котловин, представляющих собой седиментационные бассейны, им свойственна максимальная мощность, к краям они постепенно выклиниваются и на разделяющих впадины повышенных участках дна либо залегают маломощный покров из гравия и грубозернистых песков, либо непосредственно обнажается коренное ложе, образованное ледниковыми или дочетвертичными породами. Мощность послеледниковых отложений в седиментационных бассейнах Великих озер обычно 5—10 м. Реже она достигает несколько больших величин. По-видимому, исключением является оз. Эри, в котором мощность послеледниковых отложений в центральных частях Восточного и Центрального бассейнов превышает значения соответственно в 40 и 20 м.

Хозяйственное освоение Приозерья особенно интенсивно происходило после 1850 г. и в настоящее время в этом районе



сформировался крупный мегалополис (рис. 17). О соотношении главных типов земель бассейнов озер можно судить по данным табл. 41.

Из табл. 41 видно, что наибольшая антропогенная нагрузка приходится на озера Мичиган, Эри и Онтарио. Она отражается на процессах мобилизации и выноса вещества с территории Приозерья и его перераспределении, а также в новообразованиях и аккумуляции в озерных котловинах. Влияние хозяйственной деятельности сказывается на переработке берегов, которая осо-

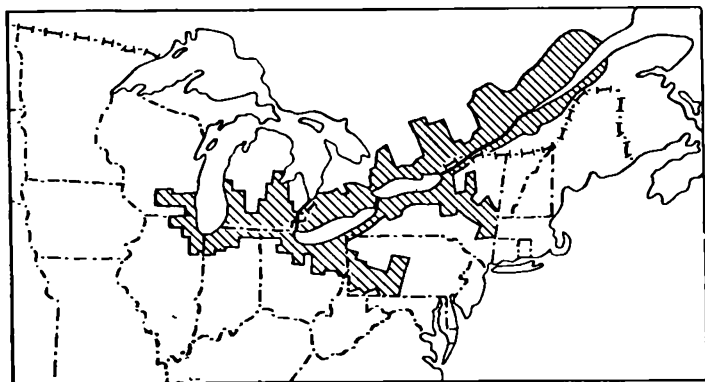


Рис. 17. Мегалополис Великих озер

бенно интенсивно осуществляется в осеннее время, когда высокие уровни воды в озерах сочетаются с усилением штормовой активности.

Детальное изучение участка Лейк-Блафф, находящегося на оз. Мичиган в пределах штата Иллинойс, показало, что за последние 100 лет берег, сложенный моренными суглинками и озерными песками, отступил в среднем на 80 м. При этом объем потерянного материала составил 4,8 млн. м³. Одной из причин столь интенсивной абразии было уничтожение растительности при освоении побережья.

На оз. Эри особенно сильно разрушается северное побережье, также сложенное ледниковыми, озерно-ледниковыми и

Рис. 16. Схема взаимодействия природно-антропогенных и антропогенных процессов в пределах проточно-озерной ПАЭС в условиях уравновешенного водного баланса (по И. В. Воробьеву и С. П. Горшкову, 1979 г.).

Сплошные линии стрелок обозначают потоки вещества в озеро, толщина линий — относительную мощность потоков, пунктирные линии стрелок — потоки вещества из озер, точечные линии — редуцирующее действие хозяйственных мероприятий на мощность потока

Процентное соотношение главных типов земель Приозерья
(по М. Джонсону и Н. Бергу с дополнением)

Наименование	Озеро		Главные типы земель, %		
	Водная масса		Сельско- хозяйственные	Лесные	Городские
	км ²	%			
Верхнее	12 221	53,8	2	50	8
Мичиган	4 871	21,4	34	10	37
Гурон	3 539	15,6	17	24	9
Эри	458	2,0	31	5	28
Онтарио	1 636	7,2	16	11	18
Всего	22 725	100	100	100	100

водно-ледниковыми образованиями. В полосе между Рондеу и Лонг Поинт длиной 120 км имеются участки, которые в течение последних 150 лет отступали со скоростью до 3 м/год. Сделанное сравнение показателей энергии волн и скоростей абразии выявило большое расхождение между ними. Это дало основание считать, что наиболее сильно абрадируемый 20-километровый обрыв в средней части отрезка Рондеу—Лонг Поинт (район Порт-Стэнли) быстро разрушается вследствие специфических гидрогеологических условий, стимулирующих частые оползни.

Однако наиболее универсальным механизмом воздействия на абразию является нарушение вдольберегового потока наносов, которое имеет место при прокладке навигационных путей к причалам, строительстве волнорезов и других берегозащитных сооружений. В настоящее время места, которые необходимо защитить от абразии, иногда ограждаются такими бунами, которые не мешают наносам двигаться вдоль берега. Так был защищен 30-метровый обрыв в г. Милуоки на оз. Мичиган. В результате этого отступление берега со скоростью 0,6 м/год прекратилось и он покрылся растительностью. Однако рядом отступление берегового уступа продолжается.

Продукты абразии играют главную роль в питании седиментационных бассейнов озер Эри и Мичиган, о чем свидетельствуют данные табл. 42.

Ряд данных позволяет предполагать, что во всех случаях в озерах с наиболее освоенными водосборами темпы постколониальной седиментации превосходят скорость природной. Природно-антропогенные осадки Великих озер (их средняя мощность 20—50 см) в преобладающем количестве (50—60 %) содержат глинистые частицы, несколько меньше алевритовых частиц (35—40 %) и очень мало песчаных (от 8 до 4 % и менее). Обломочные минералы илов представлены главным обра-

Приход и расход вещества (млн. т), формирующего алевроито-глинистые илы в озерах Мичиган, Эри и Онтарио (по А. Кемпу, Ч. Картеру и др.)

Материал	Эри	Онтарио	Мичиган
Приход			
Продукты абразии	7,9—10	2,77	— **
Взвешенные наносы рек	4,1	5,64	—
Эоловый материал	0,5	0,12	2,04
Автохтонное органическое вещество	1,0	0,21	0,82
Материал, переотложенный драгами	1,4	0,40	—
Расход			
Взвешенные наносы вытекающей реки	4,5—5	3,44	—
Продукты седиментации	10,4—13,0*	5,70	12,6***

* По колонкам скважин величина седиментации 14,3 млн. т/год.

** Нет данных.

*** Ориентировочная цифра.

зом кварцем и полевым шпатом и в небольшом количестве кальцитом и доломитом. Среди глинистых минералов 70—80 % иллита и 20—30 % хлорита и каолинита. Водонасыщенность илов сверху так высока, что верхнему слою мощностью 3 см на глубине 10 см соответствует слой осадка мощностью 1 см, а на глубине 1 м — слой осадка мощностью 0,5 см. Судя по колонкам илов из озера Мичиган, объемная масса осадков меняется на этих уровнях в среднем от 1,2 до 1,3 и 1,6 г/см³.

Постколониальные донные осадки Великих озер, особенно озер Мичиган, Эри и Онтарио, обогащены углеродом органического вещества, азотом, фосфором, тяжелыми металлами, ядохимикатами. Биогенные вещества попадают в озера из локализованных (точечных) и площадных (неточечных) антропогенных источников, а также с веществом природных объектов, разрушаемых преимущественно ускоренными природно-антропогенными процессами. О соотношении мощностей таких источников можно судить по данным для оз. Мичиган. С. Эйсмейрейч и соавторы указывают, что в 1976 г. в него поступило 10 750 т фосфора, в том числе прямо в озеро с промышленными стоками 61 и с коммунальными 1070; с речными водами, в которых количество городских стоков примерно вдвое больше прямо попадающих в озеро, 4230; за счет абразии 3700 и эолового привноса 1690 т.

В настоящее время отдельные прибрежные участки оз. Мичиган подвергаются эвтрофикации. Этот процесс свойствен также озерам Эри и Онтарио.

Поведение загрязняющих веществ в озерах во многом зависит от экродинамики последних. Познавание этой зависимости важно для понимания процесса самоочищения озерных вод и, наоборот, заражения их донных осадков различными токсикантами. Ниже этот вопрос рассматривается на основе данных о загрязнении озер тяжелыми металлами.

Загрязнение тяжелыми металлами. В настоящее время такому загрязнению подвергаются все Великие озера. Однако ниже рассматриваются особенности поведения тяжелых металлов лишь в озерах Мичиган, Эри и Онтарио, так как по ним имеется более подробные и всесторонние сведения.

Для установления особенностей поведения тяжелых металлов в этих озерах важными являются данные о темпах водообмена и накоплении органического вещества в тех из них, антропогенные нагрузки на которые наиболее высоки (табл. 43).

Таблица 43

Некоторые морфодинамические характеристики озер Мичиган, Эри и Онтарио

Озеро	Площадь, км ²		Объем воды, км ³	Средняя и максимальная (в скобках) глубины, м	Объем ежегодного обмена воды, км ³	Средняя скорость накопления осадков* и входящих в них органических веществ (в скобках)**, г/м ² в год	Средняя концентрация С _{орг} в современных осадках, % ***	Масса ежегодно накапливающихся донных осадков, млн. т	
	в целом	седиментационных бассейнов						всего	в том числе органических веществ
Мичиган	58 016	35 400	4871	87 (281)	49,1	355 (16,2)	2,51	12,6	0,57
Эри	25 666	15 644	458	17 (60)	175,1	915 (62,7)	3,16	14,3	0,82
Онтарио	19 684	10 405	1636	86 (244)	208,9	454 (40,3)	4,89	4,8	0,43

* Модуль валовой седиментации.

** Модуль седиментации органического вещества.

*** При пересчете принято содержание С_{орг} в органическом веществе, равное 55 % его массы.

Из табл. 43 видно, что наиболее динамичным является оз. Эри, которому свойственны интенсивный водообмен и самая высокая скорость осадконакопления.

Основная масса тяжелых металлов привносится в озера с речным стоком и по воздуху. Данные о содержании тяжелых металлов в воде озер и в различных модификациях обломочного материала сведены в табл. 44 и 45.

Данные табл. 44 свидетельствуют о том, что многие из рассматриваемых поллютантов находятся в воде оз. Мичиган вместе со взвешенными частицами, по-видимому, будучи адсорбирован-

ПДК некоторых тяжелых металлов в воде и их содержание
в водах озер Мичиган и Эри

Металл	ПДК, мкг/л	Содержание в воде, мкг/л		Металл	ПДК, мкг/л	Содержание в воде, мкг/л	
		Мичиган	Эри			Мичиган	Эри
Cr	50	0,55—1,1*	—	V	100	—	54
Cu	20	—	11	Zn	1000	3—80*	205
Ni	1000	—	—	Hg	5	—	—
Pb	50	0,4—20*	39				

* Единичные анализы, дающие представление о колебаниях содержания металлов в воде.

Таблица 45

Содержание тяжелых металлов во взвешенном материале, донных осадках и береговых плейстоценовых отложениях озер Мичиган, Эри и Онтарио

Металл	Содержание, мкг/г									
	в современных природно-антропогенных осадках устья р. Миллу-оки	во взвешенном материале крупнее 0,45 мм (оз. Мичиган)	в современных природно-антропогенных донных осадках озер			в подстилающих природных осадках озер			в плейстоценовых отложениях берегов озер	
			Мичиган	Эри	Онтарио	Мичиган	Эри	Онтарио	Эри	Онтарио
As	—	27	14	—	—	5	—	—	—	—
Br	—	10	62	—	—	35	—	—	—	—
Co	180	—	13	—	—	14	—	—	—	—
Cr	1295	—	77	—	—	52	—	—	—	—
Cu	73,4	39	37	57	98	20	29	44	26	25
Ni	25	47	34	—	—	35	—	—	—	—
Pb	149	56	88	107	220	20	28	30	39	27
V	—	56	48	62	67	62	41	69	33	35
Zn	295	1420	206	279	477	66	98	105	54	41
Hg	1,2	—	0,20	0,86	2,35	0,05	0,08	0,07	0,04	0,05
Cd	16,6	—	—	3,6	5,1	—	1,1	1,3	1,8	1,5

ными в основном на зернах глинистых минералов и органическом детрите. В поверхностных осадках, накопившихся за период становления и функционирования прилегающей к оз. Мичиган части мегалополиса, тяжелые металлы находятся в концентрациях, как правило, в несколько раз превышающих фоновые. Накопление кобальта и никеля не фиксируется.

Судя по немногочисленным данным, концентрации тяжелых металлов в воде озер Мичиган и Эри хотя и не достигают ПДК, но все же бывают значительными. В донных осадках содержание этих поллютантов хорошо коррелирует с их механическим составом и особенно со степенью обогащения органическим веществом. Самые высокие концентрации тяжелых металлов свойственны природно-антропогенным осадкам оз. Онтарио, которые наиболее обогащены органическим веществом (см. табл. 43).

В то же время сравнение абсолютных среднегодовых величин накопления тяжелых металлов в озерных осадках свидетельствует об их наибольшем извлечении из вод оз. Эри, в котором темпы седиментации превосходят таковые в озерах Мичиган и Онтарио (табл. 46).

Таблица 46

Количество тяжелых металлов, поступающих в донные осадки озер Мичиган, Эри и Онтарио

Металл	Количество тяжелых металлов в донных осадках озер					
	Мичиган		Эри		Онтарио	
	т/год	гм/м ² в год	т/год	гм/м ² в год	т/год	гм/м ² в год
Hg	2,5	0,000 07	12,3	0,0008	18,3	0,001
Pb	1109 (2300)*	0,031	1530	0,098	1056	0,097
Zn	2596 (4550)	0,073	3989	0,255	2290	0,212
Cu	466 (3430)	0,013	815	0,052	470	0,044
Cd	—	—	51	0,003	24,5	0,002
V	605 (639)	0,017	886	0,056	322	0,030

* В скобках указано количество металлов, поступающих в воды оз. Мичиган из антропогенных источников.

Второе место по накоплению тяжелых металлов в донных осадках, по-видимому, занимает оз. Мичиган. Показательно, что величина поступления металлов (за исключением ванадия) из антропогенных источников в озеро превышает величины их захоронения, что вполне естественно, поскольку некоторые количества каждого металла-загрязнителя выносятся из озера с оттоком воды.

Несмотря на отсутствие данных для оценки перераспределения тяжелых металлов с оттоком озерных вод, изложенные сведения можно использовать для выявления особенностей самоочищения трех различных по своей экзодинамике крупных озер. Осаждение тяжелых металлов из вод рассматриваемых озер происходит весьма интенсивно даже при концентрациях их в воде ниже ПДК. Это связано с тем, что из воды металлы извлекаются живыми организмами, поглощаются органическим веществом и сорбируются на минеральных частицах, особенно на глинистых минералах. В водах рек и водохранилищ медь, вероятно, в основном связана с органическим веществом, свинец и цинк в меньшей степени с органическими коллоидами и в большей степени с органическими частицами. При этом часть цинка мигрирует в форме подвижных растворенных ионов, подобно почти всему присутствующему в воде кадмию. Ртуть находится в пресных водах как на частицах глинистых минералов и органического детрита, так и в виде растворенных органо-ртутных соединений, в частности метилртути. Исследования показывают, что очень низкое содержание в воде озер метилртути (менее 0,24 нг/л) обусловлено интенсивным накоплением ее живыми организмами.

Экспериментальным путем установлено, что ртуть интенсивно извлекается из воды бактериями. Таким образом, богатые бактериями илы обладают большей способностью к извлечению из воды тяжелых металлов.

В рассмотренных случаях самая значительная аккумуляция тяжелых металлов в донных осадках оказалась связанной с наибольшими скоростями седиментации минерального и органического материала (оз. Эри). Хозяйственная деятельность человека в пределах водосбора этого озера стимулирует его евтрофирование, а от этого в прямой зависимости находится скорость накопления органического вещества в осадках. Под воздействием антропогенного фактора, в результате ускоренной эрозии, абразии и дефляции увеличивается также поступление минеральных частиц. Промышленность и транспорт в бассейне оз. Эри загрязняют его воды органическими веществами, биогенами, тяжелыми металлами, а сельское хозяйство, коммунальное хозяйство и различного рода строительные работы — преимущественно органическими веществами, биогенами и минеральными частицами, которые способствуют переходу металлов из воды в донные осадки.

Аналогичные процессы протекают и в пределах водосборов и чаш двух других озер, но их природно-антропогенный механизм вывода тяжелых металлов в осадках выражен несколько слабее, чем у оз. Эри. За счет гораздо большей величины седиментации в целом в оз. Мичиган, судя по ориентировочным расчетам, из воды в осадок извлекается больше тяжелых металлов, чем в оз. Онтарио. Однако чрезвычайно тонкодисперсные

и богатые органическим веществом илы последнего характеризуются самыми высокими концентрациями металлов-поллютантов.

Зависимость аккумуляции тяжелых металлов от экодинамики рассмотренных озер хорошо выявляется при графическом сравнении ее показателей с показателями интенсивности водообмена озер, накопления осадков и их органической составляющей.

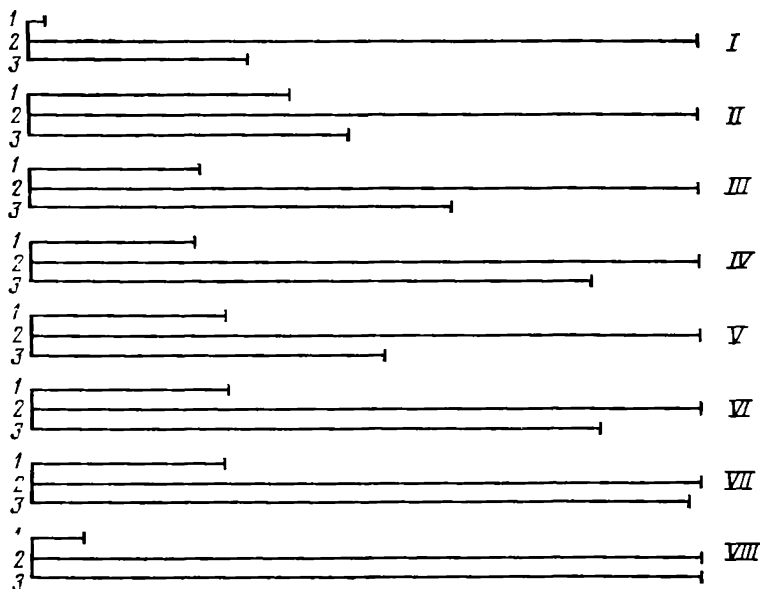


Рис. 18. Диаграмма относительной интенсивности накопления осадков и их составляющих (масса на единицу площади) и водообмена в озерах Мичиган (1), Эри (2) и Онтарио (3) (по Т. И. Кондратьевой и С. П. Горшкову, 1980 г.).

I — водообмен; II — седиментация; III — накопление органического вещества; IV—VIII — накопление металлов: Cu(IV), V(V), Zn(VI), Pb(VII), Hg(VIII)

Показатель интенсивности водообмена каждого озера — это процентное выражение доли обновляемых (обмениваемых) вод от его общей водной массы. Остальные цифры представляют собой модули накопления осадка в целом или какого-либо его компонента. Все максимальные цифры, характеризующие каждый из процессов, приняты за 100 % и по отношению к ним вычислены процентные значения остальных величин. Результаты пересчета отображены на диаграмме (рис. 18), из которой хорошо видно, что по интенсивности накопления тяжелых металлов (на единицу площади) рассмотренные озера располагаются в следующем порядке: Эри > Онтарио > Мичиган. Лишь ртуть накапливается интенсивнее всего в оз. Онтарио. Это соответствует

динамичности озер, если оценивать последнюю по модулям седиментации, с которыми коррелируют и показатели интенсивности водообмена.

Поскольку концентрации тяжелых металлов в воде Великих озер подвержены колебаниям во времени и в пространстве и иногда превышают предельно допустимые концентрации их для отдельных видов водопотребления, мощный механизм извлечения этих металлов из воды и аккумуляции в донных отложениях, свойственный оз. Эри, кажется на первый взгляд весьма полезным. Однако сосредоточение в озерных илах все возрастающих количеств тяжелых металлов представляет значительную опасность.

Помимо того что тяжелые металлы механическим путем и по пищевым цепям переходят в другие компоненты природной среды, они при определенных условиях вновь переходят из осадка в воду. Это происходит: 1) при уменьшении рН озерных вод, что, например, может быть связано с прогрессирующим загрязнением соединениями серы; 2) при понижении обеспеченности озерных вод кислородом вследствие возрастающей эвтрофикации и 3) при росте поступления некоторых естественных и синтетических соединений.

По мере накопления донных осадков происходит их частичное обезвоживание и разложение значительной доли органического вещества. Эти процессы сопровождаются, как свидетельствуют экспериментальные данные, миграцией некоторой части тяжелых металлов в поверхностный слой осадков, более обогащенный водой и органическим веществом. Если явление вторичного обогащения поверхностного слоя природно-антропогенных осадков тяжелыми металлами в естественных условиях имеет значительные размеры, то со временем оно будет увеличивать потенциальные возможности загрязнения озерных вод этими поллютантами.

Изложенные данные позволяют наметить категории пресноводных озер по их способности к очищению воды от тяжелых металлов и накоплению последних в донных осадках. Самая интенсивная очистка происходит в озерах с высокими модулями седиментации осадков, причем эта очистка находится также в прямой зависимости от модуля седиментации органического вещества. Наименьшей способностью к переводу металлов в донные осадки, по-видимому, будут обладать олиготрофные озера с низкими модулями седиментации. Мезотрофные озера с умеренной скоростью седиментации должны занимать промежуточное положение между озерами с интенсивным и слабым самоочищением от тяжелых металлов.

Поскольку хозяйственная деятельность человека по-разному влияет на озерную экодинамику, то, приблизительно оценивая характер изменения последней, можно предположить, как будет меняться способность озера к самоочищению от загрязнения тя-

желыми металлами. Например, если бы сейчас канадское побережье оз. Эри, которое поставляет в водоем основную массу продуктов абразии, удалось защитить от дальнейшего размыва, в водах озера, возможно, ощутимо увеличилась бы концентрация тяжелых металлов. Не исключено, что такая тенденция будет обнаруживаться по мере уменьшения евтрофирования озер Эри и Онтарио.

Изучение влияния хозяйственной деятельности человека на озерную экодинамику и процессы загрязнения и самоочищения озерных вод от поллютантов имеет большое значение для целей рационального хозяйственного использования приозерных районов. В этом случае важную роль играет и познание закономерностей загрязнения озер тяжелыми металлами.

БЕССТОЧНО-ОЗЕРНЫЕ ПАЭС

Функционирование ПАЭС этого типа в условиях стабильного водного баланса во многом похоже на действие рассмотренных проточно-озерных систем. Однако в настоящее время для ряда крупнейших бессточных озер характерно неуклонное понижение уровня воды. Этому способствовало наличие маловодных годов, когда испарение с поверхности озер не компенсировалось стоком в них и осадками. Однако во вторую половину XX в. некоторые озера на территории СССР недополучили часть речного стока в связи с его зарегулированием и безвозвратным использованием воды на орошение и другие нужды. Особенно неблагоприятны последствия природно-антропогенной регрессии Каспийского и Аральского морей и озера Балхаш — водоемов, имеющих важное народнохозяйственное значение.

Каспийское море. Уровень воды этого крупнейшего бессточного водоема находился в конце XIX в. на отметке минус 26 м. Сейчас водная поверхность Каспия лежит на высоте минус 29 м. Структура хозяйственного использования побережья величайшего озера такова, что восстановление его водной массы до указанной максимальной отметки принесло бы очень большой ущерб. Поэтому оптимальным считается вариант стабильного состояния Каспия на уровне минус 28,5, а в очень маловодные годы — минус 29 м.

Аральское море с 1960 г. очень быстро теряло свою массу, в результате чего его понижение составило 6 м, а осушенная площадь достигла более 1,1 млн. га. Экономические проблемы, возникающие в связи с этим, чрезвычайно остры. Поэтому ставится вопрос о пополнении Арала водами, которые будут переброшены из бассейна Оби.

В озере Балхаш между 1971 и 1977 гг. уровень воды понизился на 1,3 м. Западная часть озера, испытывающая дефицит речного стока в связи с зарегулированием р. Или, является в основном пресноводной и служит для водоснабжения. Пони-

жение уровня озера усилило приток солоноватых вод из восточной части озера. Минерализация воды в его западной части стала расти. Чтобы сохранить ресурсы пресных вод оз. Балхаш, разработаны проекты по отчленению его западной части от восточной.

Изменение экзодинамических процессов в пределах перечисленных бессточных озерных ПАЭС в условиях понижения уровня водоемов имеет сходный характер. Отмечены такие преобразования: 1) ослабление абразии берегов; 2) ускорение роста их аккумулятивных участков; 3) уменьшение потока вещества в седиментационные бассейны водоема; 4) смещение фациальных зон седиментационных бассейнов от периферии к центру, изменение их площадей, а иногда и полное выклинивание отдельных из них; 5) понижение уровня подземных вод и рост их минерализации; 6) деградация растительного и почвенного покровов; 7) резкая активизация эоловых процессов на осушенных и прилежащих площадях с деградирующими почвами и растительностью.

Особую опасность представляет возвратный эоловый вынос солей из осушающейся прибрежной зоны Арала. К. И. Лапки и Э. Д. Рахманов указывают, что даже микродоли солей, взвешенных в атмосфере, могут стерилизовать плодовые органы растений и погубить урожай. Региональный разнос солей будет очень вероятен и распространится на площадь до 20 млн. га, если уровень Арала понизится еще на 9 м, т. е. достигнет абсолютной отметки 38 м. В полуметровой толще грунта между отметками 53 и 38 м содержится примерно 339 млн. т солей (в среднем 38,6 кг/м²).

Функционирование проточно-озерных и бессточных озерных ПАЭС существенно различается в силу их приуроченности к территориям с различной увлажненностью. Проточно-озерные ПАЭС обычно находятся в регионах с нормальным или избыточным увлажнением. В относящихся к ним котловинах крупных озер со стабилизированным водным балансом происходит ускорение абразии, транспорта, новообразования и аккумуляции вещества. Обычной является эвтрофикация водоемов, загрязнение воды и донных осадков ядохимикатами и тяжелыми металлами.

Для развития ряда бессточных озерных ПАЭС становится характерной устойчивая озерная регрессия, последствиями которой является резкое изменение мощности различных процессов, ослабление потоков вещества в озеро и усиление возвратного эолового потока. Одним из следствий такой трансформации бессточных озерных ПАЭС является опустынивание прилежащих низменностей речных дельт. Однако они могут затронуть и более отдаленные пространства и привести к снижению урожайности сельскохозяйственных культур в связи с возможным усилением эолового разноса солей.

Приспособление земной коры и в особенности ее континентальной части к нуждам цивилизованного человечества, разделенного на отдельные государства, привело к созданию на суше сложно распределенных областей и зон антропогенной денудации, транспорта и аккумуляции вещества. Концентраторами вещества являются города. Лишь городские территории, в пределах которых ведется подземная добыча твердых полезных ископаемых или выкачивание флюидов, обычно представляют собой места преобладания выноса вещества над его привносом. В какой-то мере вещество земной коры аккумулируется в полосах линейных сооружений, служащих транспортными артериями. Однако особенно велика антропогенная аккумуляция там, где создаются крупные свалки отходов. Часто для этого используются естественные отрицательные формы рельефа, вплоть до участков дна океана и крупнейших озер. Например, в оз. Верхнее в районе г. Дулута (США) в 1952—1969 гг. в среднем ежегодно сбрасывалось почти 15 млн. т отходов горнообогатительной фабрики. Это, по-видимому, значительно превышает суммарное поступление вещества в указанное озеро с речным стоком, ветром и в результате переработки берегов.

Большая часть освоенной суши служит сферой антропогенного выноса вещества. Это в первую очередь сельскохозяйственные земли и эксплуатируемые леса, а также места извлечения полезных ископаемых. Исключение составляют лишь уголья, вынос с урожаям с которых полностью компенсируется или даже перекрывается привносом биогенных и некоторых других веществ.

Антропогенное перераспределение вещества осуществляется в пределах всех трех внешних геосфер, но больше всего на поверхности освоенной суши. Поэтому не будет преувеличением считать, что *важнейшие особенности механизма антропогенного изъятия, транспорта и аккумуляции вещества земной коры запечатлены в мировой структуре землепользования.* Последняя, хотя и связана с природными условиями суши, а следовательно, с ее делением на ПЭС, во многом зависит от исторически сложившегося политического деления мира и социально-экономического устройства различных стран, от конкретного распределения и плотности населения в них.

Устройство природного глобального экзодинамического механизма определяется распределением ПЭС и их составляющих. В частности, земная кора в пределах неледниковой суши разрушается и наращивается экзодинамическими процессами благодаря работе бассейново-речных и в меньшей степени эоловых, проточно-озерных и бессточно-озерных ПЭС. Однако на большей части неледниковой суши ПЭС трансформировались в ПАЭС. Таким образом, *главной особенностью современной*

экзодинамики земной коры неледниковой суши является интегрированность действия резко несогласующихся между собой механизмов природного и антропогенного перераспределения вещества. Современное экзодинамическое преобразование земной коры обеспечивается природными энергетическими источниками и энергией, которая осваивается и контролируется человеком (см. табл. 2). При этом поглощение и утилизация внутри ПАЭС природной энергии осуществляется во многом по-другому, чем это имело место в ПЭС, существовавших ранее. Именно поэтому земная кора преобразуется извне тремя группами процессов: природными, антропогенными и природно-антропогенными. Каковы же главные результаты такого преобразования?

Три главные особенности современной экзодинамики земной коры суши. Потребности человечества в материальных ресурсах огромны, а их удовлетворение осуществляется во многих случаях с явным превышением допустимых нагрузок на те или иные компоненты природы. В результате наиболее неустойчивые составляющие земной коры суши уже сейчас подверглись очень значительной редукции. Первой особенностью современной экзодинамики земной коры суши является беспрецедентно быстрая убыль ресурсов ее органического вещества. Живое вещество суши, представленное более чем на 99 % растительностью, уничтожено на 1/3 [19]. Редукция наземной биосферы идет все быстрее. Если между 1975 и 1976 гг. площадь лесов суши сократилась на 11 млн. га, то между 1976 и 1977 гг. убыль занимаемой ими территории составила 68 млн. га (данные ФАО). Замена лесной растительности на нелесную означает потерю фитомассы в количестве 900—1100 т/га в живом весе. В конце 60-х годов XX в. фитомасса суши, по данным А. М. Рябчикова [30], уже не превышала 4400 млрд. т в живом весе. Какими же огромными выглядят ее потери в последние годы, если только между 1976 и 1977 гг. убыль фитомассы лесов (сырой вес) была близка к 68 млрд. т!

Антропогенная абиотизация земной коры (только так можно назвать этот процесс) сочетается с разрушением и окислением органического вещества почв мира (около 2 млрд. т/год) и со сжиганием ископаемого топлива (около 7 млрд. т/год). Все это вместе взятое сейчас является основной причиной громадной эмиссии в атмосферу антропогенного CO₂. Буферная система океана, оттягивающая избыток CO₂, срабатывает лишь частично и содержание этого газа растет в атмосфере Земли ускоряющимися темпами (рис. 19). По мнению многих ученых, парниковый эффект, создаваемый накоплением антропогенного CO₂ в атмосфере, уже проявляется и в ближайшие десятилетия может стать причиной «перегрева» Земли.

Абиотизация земной коры суши может серьезно ухудшить качество воздуха на всей планете. Согласно Н. П. Анучину, В. Г. Атрохину и соавторам, кислород леса качественно отли-

чается от вырабатываемого планктоном морей и океанов. Первый насыщен ионами отрицательного заряда, благоприятно влияющими на организм людей. Лесной воздух имеет ярко выраженные антимикробные свойства благодаря выделению деревьями специфических веществ, подавляющих развитие патогенных бактерий. Таким образом, абиотизация суши является серьезной угрозой здоровью всего населения Земли. Так природа может ответить на антропогенное нарушение круговорота углерода и стремительную убыль ресурсов органического вещества земной коры суши.

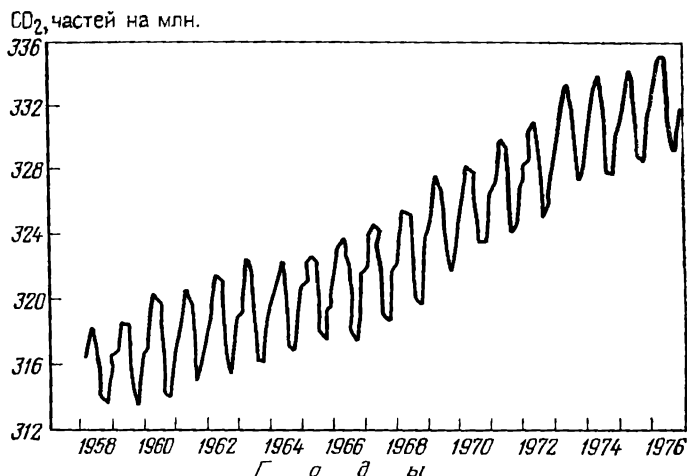


Рис. 19. Диаграмма роста концентрации CO_2 в атмосфере Земли (станция Мауна Лоа) (по Грейнеру, 1980 г.)

Вторым следствием антропогенной нагрузки на земную кору является иссушение ее континентальных сегментов, что ощутимо сказывается и на изменении водной массы океана. Согласно Р. К. Клиге, за 1900—1970 гг. из водоносных горизонтов было безвозвратно удалено 7668 км^3 воды, что в среднем составляет $108 \text{ км}^3/\text{год}$. Однако темпы современного расходования подземных вод, по-видимому, гораздо выше. Некоторое накопление подземных вод имеет место в зонах водохранилищ и каналов. Однако оно может перекрываться потерями подземных вод, происходящими при осушительных мелиорациях.

Особо следует обратить внимание на огромные размеры площадей, где произошло уменьшение питания подземных вод. К ним относятся все земли, где хозяйственная деятельность привела к увеличению поверхностного стока вод и снижению подземного. Важно учитывать, что земли, на которых происходит такая метаморфоза, продолжают быстро увеличиваться по площади. Возникает вопрос, не является ли растущее природно-

антропогенное снижение притока атмосферных вод в земную кору и соответствующее неучтенное уменьшение запасов воды в ней одним из важных факторов современного повышения уровня океана? Если это так, то вышеприведенные оценки безвозвратных потерь воды неледниковой суши, принадлежащие Р. К. Клите, могут оказаться заниженными, а цифры убыли материковых ледников — завышенными. Следовательно, нарушение круговорота воды человеком, по-видимому, может быть еще значительнее, чем это представляется на основании оценок отдельных авторов.

Иссушение континентальных сегментов земной коры и, в частности, безвозвратное расходование ресурсов подземных вод, наряду с очевидными негативными последствиями, таит в себе еще немало непредвиденного. Об этом можно догадываться по той огромной роли, которую играют литоморфные микроорганизмы в газообмене, происходящем между земной корой и атмосферой. А ведь именно условия существования этих микроорганизмов сильно меняются при истощении подземных вод суши.

Третьей особенностью современной экзодинамики земной коры суши является резкое усиление перераспределения твердого вещества. Громадные масштабы его перемещения механизмами, превышающие триллионы тонн в год, дополняются также очень значительным по размерам природно-антропогенным движением вещества.

Механический снос со скоростями в десятки — сотни тонн на гектар в год в природных условиях обычен только для нивально-гляциального пояса гор с обильным увлажнением. Сейчас с такой же скоростью разрушаются не только стройплощадки и отвалы грунтов, но и большие площади пашен и пастбищ, а также обезлесенных территорий (гари и сплошные вырубki) во многих странах мира.

Суммарный эффект механического сноса с различных типов земель и сопряженной аккумуляции трудно поддается учету, так как сносимый материал накапливается как в субэразальных условиях, так и в субквальных. Примерное распределение продуктов механического сноса в различных сферах аккумуляции было показано на примере участка Вестерн Ран Северного Пидмонта (штат Мэриленд, США). Лишь третья часть обломочного материала была вынесена здесь за пределы мелкой долинной сети. По данным И. В. Старостиной, в земледельческих районах типа бассейна Оки доля материала твердого стока крупных рек составляет около 10 % от общей массы продуктов механического сноса.

Эти факты позволяют лучше осмыслить данные по твердому стоку рек мира и аккумуляции осадков в озерах и водохранилищах. Общий мировой речной сток взвешенных наносов оценен В. В. Алексеевым и К. Н. Лисициной в 15,7 млрд. т/год. Вместе

с влекомыми наносами цифра мирового речного твердого стока может быть увеличена до 17,4 млрд. т/год. Аккумуляция осадков в озерах и водохранилищах мира, по подсчетам автора, может достигать соответственно 4,8 и 13,4 млрд. т/год. Следует также учитывать, что золотой вынос с суши достигает, по Л. Г. Бондареву, не менее 2 млрд. т/год. В несколько сотен миллионов тонн оценивает этот автор ежегодный поток продуктов абразии в океан. Таким образом, за счет механического сноса неледниковая суша ежегодно теряет порядка 36 млрд. т обломочного материала. Поскольку сейчас человеком освоено около 2/3 площади неледниковой суши, можно считать, что большая часть продуктов механического сноса с нее поставляется природно-антропогенными процессами. А так как удаляемое с суши твердое вещество составляет лишь некоторую сравнительно небольшую долю (10—20 %) от всей перемещаемой массы, то в целом перераспределение на суше твердого вещества под воздействием природно-антропогенных процессов сейчас, по-видимому, достигает первых сотен миллиардов тонн в год.

Антропогенные и природно-антропогенные процессы — факторы загрязнения. Антропогенное перемещение вещества в большинстве случаев связано с необходимостью его потребления, что приводит к аккумуляции его меньшей части в местах потребления и сбросу и рассеиванию остального количества. Рассеивание и сброс вещества происходят также на всех этапах его получения или извлечения, а также доставки к потребителю.

Многое из того, чем пользуется человек, загрязняет окружающую среду. Широкий разнос загрязняющих веществ происходит вследствие того, что антропогенное перераспределение вещества тесно связано с его природно-антропогенным перемещением. Природно-антропогенными процессами не только мобилизуются и разносятся антропогенные поллютанты, но и формируются собственные. «Загрязнителями», в основном имеющими природно-антропогенную природу, являются твердые частицы. Последние считаются загрязнителем номер один поверхностных вод США. По-видимому, это же можно сказать про загрязнение воды в большинстве других стран мира. Главнейшим поставщиком наносов служат сейчас сельскохозяйственные земли, в особенности пашня. Очень много обломочного материала смывается в реки с мест сплошных рубок леса, с территорий под городским строительством и сооружением линейных объектов, с участков, где добываются полезные ископаемые.

Рассеивание, перенос и аккумуляция загрязняющих веществ осуществляются в соответствии с закономерностями функционирования ПАЭС. Знание таких закономерностей дает возможность понять особенности распределения загрязняющих веществ в земной коре, поверхностных водах и атмосфере того или иного участка суши; оно позволяет лучше оценить ущерб от загрязне-

ния и потенциальную опасность, таящуюся в широком распространении поллютантов в современных природно-антропогенных образованиях.

О геологическом будущем. Ускорение таких процессов, как убыль органического вещества и абиотизация земной коры, ее иссушение и механическое разрушение, не может не вызывать тревоги. По сути дела, это означает, что человек беспрецедентно быстрыми темпами меняет природное динамическое равновесие между тремя внешними геосферами, которое поддерживается, по мнению В. И. Вернадского и его последователей, живым веществом планеты. В прошлом, учитывая наличие в истории Земли не менее четырех гляциозэр (Чумаков, 1978 г.; Труды ГИН, вып. 308), условия взаимодействия и связи между тремя геосферами также существенно менялись, но, конечно, с меньшей, чем сейчас скоростью. Однако и тогда, по-видимому, каждая фаза ускоренной перестройки природных условий совпадала со временем усиления напряженности геологических процессов.

Что же может произойти в ближайшем геологическом будущем, если указанные тенденции беспрецедентно быстрого изменения земной коры суши не только сохраняются, но и усиливаются? В этом случае, как уже отмечалось, за счет увеличения концентрации CO_2 в воздухе может произойти «перегрев» Земли. Он повлечет за собой изменение гидротермических условий на земной поверхности. Это, как показали М. И. Бudyко и соавторы, создаст необходимость радикальной перестройки структуры мировой экономики. Опасным для человечества будет и резкое ускорение подъема уровня океана, происходящего сейчас со средней скоростью 1,5 мм/год. Как указывают М. Г. Гросвальд и В. М. Котляков, масштабы подъема воды в океане в XXI в. могут быть очень значительными. А если при этом произойдет распад Западно-Антарктического ледникового щита, находящегося в неустойчивом состоянии, то столб воды в океане быстро вырастет на 5—7 м.

В связи с этим уместно сопоставить ряд данных: 1) согласно гипотезе Р. Мэтьюза, усиление вулканической активности в ледниковые эпохи происходило вследствие приспособления океанического дна к быстро меняющейся нагрузке водных масс; 2) вызванные землетрясения в районах строительства ряда водохранилищ имели место в процессе их заполнения и в течение десятков лет после их создания. Не будет ли дополнительная нагрузка водной массы океана тем спусковым крючком, который вызовет усиление диастрофических процессов в пределах наиболее тектонически активных участков дна океана?

Подтопление окраины материков и изменение географии их гумидных и аридных зон вызовет изменение в распределении подземных вод в пределах континентальной коры. Ответной реакцией может стать изменение режима флюидогеодинамиче-

ских движений на материках. А как прореагирует земная кора внутриматериковых сейсмоактивных зон, когда бюджет ее водного питания сильно изменится? Не будут ли поднятия и опускания земной коры в зонах наращивания и уменьшения природных водоносных горизонтов сопровождаться возбуждением сейсмической активности? Таким образом, очень вероятно, что XXI век может стать временем планетарной антропогенной активизации диастрофических процессов, являющейся логическим дополнением того всплеска экзодинамических процессов, свидетелями и виновниками которого являемся мы.

Итак, деятельность человека, усложнившая и изменившая геодинамику, пока еще резко выражена на уровне экзодинамических систем и только начинает проявляться на уровне крупнейших таксонов Зсмли — ее геосфер. Это сигнал для принятия самых серьезных мер, направленных на сохранение или хотя бы замедление нарушения природного равновесия между тремя внешними геосферами. Если же неустойчивость связей между ними будет усиливаться, то громадный энергетический потенциал этих геосфер может стать причиной таких процессов, которые будут пагубны для техносферы, высших организмов и особенно человека.

О насущных проблемах и мерах противодействия. Антропогенное изменение природной экзодинамики земной коры суши — неизбежное следствие развития мировой экономики. Гигантские масштабы мирового производства не могли не привести к негативным явлениям, часть которых человек ощущает непосредственно на себе. Причем не всегда его деятельность можно назвать нерациональной. Так или иначе перед человечеством стоит много так называемых экологических проблем. К их числу в первую очередь относятся такие проблемы; 1) загрязнение окружающей среды; 2) убыль лесных земель; 3) безвозвратная потеря продуктивных земель; 4) истощение почвенного покрова пашни и пастбищ; 5) истощение ресурсов подземных и поверхностных вод; 6) понижение уровня ряда крупных озер; 7) рекультивация нарушенных земель — брошенных и вновь образующихся; 8) оседание участков земной поверхности; 9) вызванные землетрясения; 10) изменение экзодинамических процессов при создании крупных долинных водохранилищ; 11) дигрессия лесов и безлесных ландшафтов вокруг крупных городов и промышленных центров; 12) ускоренная абразия побережий; 13) контроль над природно-антропогенными процессами в криолитозоне; 14) контроль над катастрофическими экзодинамическими процессами — лавинами, селями, оползнями, наводнениями; 15) контроль над природно-антропогенными процессами в областях развития пород, подверженных просадкам, суффозии, карсту и др.

Над этими и многими другими проблемами сейчас приходится работать в условиях ускоряющегося развития мировой эко-

номики. В настоящее время в развитых странах все больше средств отпускается на проведение исследований по рациональному природопользованию и их реализации на практике. Достигнуты ощутимые результаты в борьбе с загрязнением поверхностных вод и воздуха в некоторых регионах суши. Однако в этом направлении сделано гораздо меньше, чем предстоит осуществить. Регулирование и контроль геодинамических (в первую очередь, экзодинамических) процессов — жизненно важная проблема современности.

На фоне тревожного состояния мировой экологической ситуации особенно полезными выглядят решительные шаги в деле улучшения охраны природы и рационального природопользования, предпринимаемые в СССР и других социалистических странах. В десятой пятилетке введено в эксплуатацию большое число газоочистных и пылеулавливающих установок общей производительностью около 150 млн. м³ газа в час. В целом по СССР доля извлечения из выбросов в атмосферу твердых частиц составляет 90 %. В результате принятых мер, как указывает Ю. А. Израэль (1981 г.), заметно сократилось содержание вредных веществ в атмосферном воздухе целого ряда городов.

Много удалось достичь в экономии водных ресурсов в промышленности благодаря увеличению мощности систем замкнутого и повторно-последовательного использования воды. За период 1976—1980 г. доля объема многократно используемой воды (от общего объема промышленного водопотребления) увеличилась с 55 до 64 %, при этом экономия свежей воды в целом по стране возросла со 140 млрд. м³ в 1976 г. до 200 млрд. м³ в 1980 г. В десятой пятилетке введено несколько тысяч крупных промышленных комплексов, оснащенных очистными сооружениями. Мощности станций для очистки сточных вод возросли на 43 млн. м³ воды в сутки. Значительно улучшилось оснащение судов установками по сбросу и очистке нефтьсодержащих вод, различных жидких и твердых отходов. Существенное снижение сброса привело к улучшению состояния многих водных объектов. Повысилось качество воды в водохранилищах Волжского каскада, в бассейнах р. Урал, в рсках Лене, Неве, Кубани, Миусе, в озерах Псковском, Чудском и других, а также в Черном, Балтийском и Восточно-Сибирском морях (Ю. А. Израэль, 1981 г.).

В СССР быстро растет площадь лесопокрытых земель. На территории в 2 млн. га ежегодно проводятся лесопосадки и меры, способствующие естественному лесовосстановлению. Огромные площади лесных земель охраняются с помощью авиации от пожаров.

Увеличилась суммарная площадь заповедников, заказников и национальных парков. Все больше создается лесных полос для защиты сельскохозяйственных земель от ускоренной деф-

ляции. Широко проводится противоселевая защита, строительство противоэрозионных сооружений и агротехническая защита земель от эрозии. В десятой пятилетке рекультивировано 545 тыс. га нарушенных земель, из которых 338 тыс. га передано в сельскохозяйственное использование. В одиннадцатой пятилетке будет рекультивировано 812 тыс. га.

В нашей стране хорошо налажена и быстро расширяется служба слежения за состоянием окружающей среды. Широко проводятся работы по прогнозированию изменения природной среды районов первоочередного хозяйственного освоения. Над решением проблем охраны природы и рационального природопользования в СССР сейчас работают широкие круги ученых, инженеров и техников.

Сохранение природного потенциала земной коры суши в настоящее время во многом зависит от того, насколько быстро будет переориентирована экономика стран мира на его более рациональное использование, которое включает в себя его охрану и восстановление. Крайне важно, чтобы крупные экономические и административные единицы внутри стран были отделены природными границами в соответствии с делением суши на ПЭС. Необходимо, чтобы трансрегиональные антропогенные потоки вещества (грузо- и пассажиропотоки) также находились под контролем служб природопользования, в которые, по мнению автора, в каждой стране должны входить люди самых различных специальностей. На сегодняшний день одной из насущных задач таких служб должна стать инвентаризация природных и природно-антропогенных экодинамических систем и их составных частей с целью определения их потенциала, устойчивости и возможностей длительной эксплуатации. По сути дела всякое хозяйственное использование территорий внутри административных единиц должно теперь рассматриваться как управление соответствующими ПАЭС. Только контроль и управление природными ресурсами на региональном уровне помогут предотвратить угрозу их чрезмерного ухудшения в планетарном масштабе.

В заключение автор благодарит проф. А. М. Рябчикова за постановку задачи. Ему же и всем коллегам по работе автор глубоко признателен за обсуждение вопросов антропогенного изменения природных процессов. Автор благодарен также проф. Г. Уайту (США) за предоставление информации, которая была очень полезна при написании этой книги.

1. *Аристархова Л. Б.* Процессы аридного рельефообразования. М., Изд-во МГУ, 1971.
2. *Беннетт Х.* Основы охраны почвы. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
3. *Биосфера*/Дж. Хатчисон, Э. Оорт, Дж. Вудвелл и др. М., Мир, 1972.
4. *Быховер Н. А.* Научно-технический прогресс и проблемы минерального сырья. М., Недра, 1979.
5. *Водохранилища мира*/А. Б. Авакян, В. А. Шарапов, В. П. Салтанки и др. М., Наука, 1979.
6. *Воскресенский С. С.* Динамическая геоморфология. Формирование склонов. М., Изд-во МГУ, 1971.
7. *Глазовская М. А.* Ландшафтно-геохимические системы и их устойчивость к техногенезу.— В кн.: Биогеохимические циклы в биосфере. М., 1976, с. 99—141.
8. *Горшенин Н. М.* Эрозия горных лесных почв и борьба с ней. М., Лесная промышленность, 1974.
9. *Горшков Г. П., Якушова А. Ф.* Общая геология. М., Изд-во МГУ, 1973.
10. *Докембрий и проблемы формирования земной коры*/А. В. Сидоренко, В. А. Теняков, Св. А. Сидоренко и др. М., Наука, 1978.
11. *Заславский М. Н.* Эрозия почв. М., Мысль, 1979.
12. *Иверонова М. И.* Опыт количественного анализа процессов современной денудации. Изв. АН СССР, сер. геогр., 1969, № 2, с. 13—24.
13. *Каракумский канал и изменение природной среды в зоне его влияния*/К. Ф. Ефремов, Б. Т. Кирста, Б. С. Сапаров и др. М., Наука, 1978.
14. *Климатическая геоморфология денудационных равнин*/А. П. Дедков, В. И. Мозжерин, А. В. Ступишин, А. М. Трофимов. Казань, Изд-во Казанск. ун-та, 1977.
15. *Ковда В. А.* Аридизация суши и борьба с засухой. М., Наука, 1977.
16. *Колеман Ж., Райт Л.* Современные речные дельты: изменчивость процессов и песчаные тела.— В кн.: Дельты — модели для изучения. М., 1979, с. 32—91.
17. *Котлов Ф. В.* Антропогенные геологические процессы и явления на территории города. М., Наука, 1977.
18. *Котлов Ф. В.* Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М., Недра, 1978.
19. *Круговорот вещества в природе и его изменение хозяйственной деятельностью человека*/А. М. Рябчиков, С. П. Горшков, Е. В. Миланова и др. М., Изд-во МГУ, 1980.
20. *Куприянов В. В.* Гидрологические аспекты урбанизации. Л., Гидрометеониздат, 1977.
21. *Куракова Л. И.* Антропогенные ландшафты. М., Изд-во МГУ, 1976.
22. *Лисицин А. П.* Процессы океанской седиментации. М., Наука, 1978.
23. *Мосинец В. Н., Грязнов М. В.* Горные работы и окружающая среда. М., Недра, 1978.
24. *Моторина Л. В., Овчинников В. А.* Промышленность и рекультивация земель. М., Мысль, 1975.
25. *Наливкин Д. В.* Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л., Наука, 1970.
26. *Никонов А. А.* Голоценовые и современные движения земной коры. М., Наука, 1977.
27. *Панюков П. Н.* Инженерная геология. М., Недра, 1978.
28. *Побединский В. А.* Водоохранная и почвозащитная роль лесов. М., Лесная промышленность, 1979.

29. Родин Л. Е., Базилевич Н. И., Розов Н. Н. Биологическая продуктивность растительности земной суши и оксана и факторы. ее определяющие.— В кн.: Человек и среда обитания. Л., 1974. с. 160—175.
30. Рябчиков А. М. Структура и динамика геосферы, ее естественное развитие и изменение человеком. М., Мысль, 1972.
31. Сергеев Е. М. Рациональное использование геологической среды. Природа, 1977, № 1, с. 85—93.
32. Сергеев Е. М. Инженерная геология. М., Изд-во МГУ, 1978.
33. Сидоренко А. В. Человек, Техника, Земля. М., Недра, 1967.
34. Симонов Ю. Г., Борсук О. А. Системный подход в геоморфологии и эрозионно-денудационные морфосистемы. В кн.: Рельеф и ландшафты. М., Изд-во МГУ, 1977.
35. Словарь общегеографических терминов. М., Прогресс, т. 1, 1975.
36. Смирнов В. И. Геология полезных ископаемых. М., Недра, 1969.
37. Федорович Б. А. Основные закономерности эолового рельефообразования в песчаных пустынях. Изв. АН СССР, сер. геогр., 1970, № 1, с. 9—16.
38. Фридланд В. М. Почвы и коры выветривания влажных тропиков. М., Наука, 1964.
39. Фролов Н. М. Гидрогеотермия. М., Недра, 1976.
40. Хазанов М. И. Искусственные грунты, их образование и свойства. М., Наука, 1975.
41. Чалов Р. Ф. Географические исследования русловых процессов. М., Изд-во МГУ, 1979.
42. Черняховский А. Г. Элювий и продукты его перестроения (Казахстан и Средняя Азия). Труды ГИН. М., вып. 145, 1966.
43. Чистяков А. А. Горный аллювий. М., Недра, 1978.
44. Швец Г. И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка (на примере Украины и Молдавии). Л., Гидрометеоздат, 1974.
45. Шукин И. С. Общая геоморфология. М., Изд-во МГУ, 1960, т. 1.
46. Cooke R., Doornkamp J. Geomorphology in environment management. An introduction. Oxford, Clarendon Press, 1974.
47. Cropland erosion. U. S. Dept. of Agriculture, SCS, Washington, 1977.
48. Manning R. Impacts of recreation on riparian soils and vegetation. Water Resources Bull., 1979, v. 15, N 1, p. 30—43.
49. Sedimentation engineering. ASCS — Manuals and reports on engineering practice, New York, No. 54, 1975.
50. Tricart J. et Cailleux A. Traite de Geomorphologie. V. 1. Introduction a la Geomorphologie. Paris, 1965.

СОДЕРЖАНИЕ

Главные исходные положения	3
Актуальность проблемы	3
Определения важнейших терминов	5
Общее деление геологических процессов	7
Природные экзодинамические процессы	11
Общие сведения	11
Энергетика	15
Динамика	21
Природные экзодинамические системы (ПЭС) и комплексы (ПЭК)	25
Состояние вопроса	25
Принципы выделения	29
Бассейново-речные ПЭС	31
Водосборные ПЭК	31
Равнинные ПЭК врезания	32
Равнинные ПЭК планации	39
Равнинные ПЭК планации и врезания	46
Горные ПЭК планации	50
Горные ПЭК врезания	55
Горные ПЭК планации и врезания	58
Долинные ПЭК	59
Горные долинные ПЭК	60
Горно-равнинные долинные ПЭК	62
Равнинные долинные ПЭК	66
Приморско-дельтовые ПЭК	66
Проточно-озерные ПЭС	69
Бессточно-озерные ПЭС	70
Эоловые ПЭС	71
Антропогенные и природно-антропогенные экзодинамические процессы	76
Общие сведения	76
Терминология	79
Сельскохозяйственные мероприятия и их следствия	81
Земледелие	82
Антропогенные процессы	82
Природно-антропогенные процессы	101
Выпас	133
Антропогенные процессы	133
Природно-антропогенные процессы	138
Рекреационные мероприятия и их следствия	143
Антропогенные процессы	143
Природно-антропогенные процессы	145
Лесохозяйственные мероприятия и их следствия	146
Антропогенные процессы	146
Природно-антропогенные процессы	149
Водохозяйственные мероприятия и их следствия	151
Водохранилища	152
Общие сведения	152
Антропогенные процессы	156
Природно-антропогенные процессы	160
Каналы	177
Добыча полезных ископаемых и ее следствия	184
Добыча твердых полезных ископаемых	187

Антропогенные процессы-мероприятия	187
Антропогенные процессы-следствия	197
Природно-антропогенные процессы	200
Добыча нефти и газа через скважины	208
Антропогенные процессы-мероприятия	208
Антропогенные и природно-антропогенные процессы-следствия	209
Меры по снижению эффекта негативных последствий	210
Рекультивация земель	212
Урбано-промышленные мероприятия и их следствия	214
Городские территории	214
Антропогенные процессы	217
Природно-антропогенные процессы	226
Влияние урбано-промышленных мероприятий на экодинамику не-	
городских территорий	232
Коммуникационно-транспортные мероприятия и их следствия	235
Автомобильные дороги	236
Железные дороги	240
Магистральные трубопроводы	242
Военные действия	247
Антропогенные процессы	247
Природно-антропогенные процессы	250
Эффект антропогенного воздействия на отдельные ПЭС и экодина-	
мику суши в целом	251
Бассейново-речная ПЭС р. Колорадо (с каскадом водохранилищ)	251
Группа озерных ПЭС	260
Проточно-озерные ПЭС	261
Бессточно-озерные ПЭС	272
Планетарные результаты и перспективы	274
Список литературы	283

Сергей Павлович Горшков

**ЭКЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ОСВОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Редактор издательства Н. И. Мартьянов
Переплет художника Ю. Г. Асафова
Художественный редактор Е. Л. Юрковская
Технический редактор Н. С. Гришанова
Корректор К. И. Савенкова
ИБ № 4406

Сдано в набор 23.12.81. Подписано в печать 20.05.82. Т-08095. Формат 60×90^{1/16}. Бумага кн.-журн. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 18,0. Усл. кр.-отт. 18,0. Уч.-изд. л. 19,57. Тираж 2500 экз. Заказ № 71/8456—2. Цена 1 р. 30 к.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.

УВАЖАЕМЫЙ ТОВАРИЩ!

В издательстве «Недра»
готовятся к печати новые книги

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ условия Нечерноземной зоны РСФСР. Антыпко Б. Е., Барон В. А., Бондаренко С. С. и др.
30 л. 2 р.

Описаны геологическое строение и гидрогеологические условия Нечерноземной зоны РСФСР, ресурсы и закономерности формирования пресных, минеральных и промышленных вод, перспективы использования пресных подземных вод и возможности увеличения их эксплуатационных ресурсов за счет искусственного восполнения. Рассмотрены принципы постановки и проведения гидрогеологических исследований в районах действующих водозаборов. Приведена методика оценки масштабов загрязнения и прогноза изменения качества подземных вод под влиянием орошения сточными водами, а также методика гидрогеологических исследований для обоснования мелиоративного строительства.

Для специалистов в области гидрогеологии, инженерной геологии. Будет полезна также студентам вузов.

ПЛОТНИКОВ Н. И., КРАЕВСКИЙ С. Гидрогеологические аспекты охраны окружающей среды. 20 л. 1 р. 40 к.

Подготовлена специалистами СССР и ПНР.

Рассмотрены новое направление гидрогеологических исследований в области охраны окружающей среды, основные закономерности формирования техногенных процессов, проявляющихся при эксплуатации водохозяйственных объектов, и их отрицательное влияние на изменение геологической среды; изложены примеры локального и регионального изменения геологической среды в процессе длительной эксплуатации различных водохозяйственных объектов. Излагается гидрогеологическая сущность новых прогрессивных технологических схем эксплуатации водохозяйственных объектов как радикальное средство защиты геологической среды.

Для специалистов — гидрогеологов, мелиораторов, горных инженеров и др.

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу или заказать через отдел «Книга—почтой» магазинов:

№ 17 — 199178, Ленинград, В. О., Средний проспект, 61;

№ 59 — 127412, Москва, Коровинское шоссе, 20.

Издательство «Недра»

