

Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса для прогнозного моделирования экологической обстановки

С.А. Втюрин¹, Н.А. Князев¹, Ю.А. Палатов¹, С.Н. Романенко²

¹*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: nknyazev@iki.rssi.ru*

²*Экологический центр МО РФ*

В докладе рассмотрены вопросы разработки системы мониторинга, ситуационного и прогнозного моделирования развития экологического состояния окружающей среды с использованием материалов аэрокосмической съемки с отображением данных на цифровой топографической основе. Даны предложения по возможным источникам данных, видам и средствам обработки, а также средствам отображения и управления данными на основе ГИС. Приведены примеры полученных аэрокосмических данных, их тематической обработки и отображения результатов прогнозного моделирования на цифровой топографической основе.

Первым делом при разработке систем мониторинга и моделирования необходимо определить, что понимается под понятием "экологическая обстановка". Окружающая среда представляет собой комплексный объект, характеризуемый множеством параметров, и одновременный учет их всех представляется делом сложным. Для контроля за изменениями экологической обстановки, обусловленными антропогенной деятельностью предлагается определить набор параметров или экологических событий, комплексный учет которых сможет дать адекватную картину, как текущего состояния, так и его изменений во времени.

В целях повышения достоверности оценок экологического состояния проведен выбор экологических событий на основе принципов доступности получаемой информации при помощи средств дистанционного зондирования Земли и адекватности комплексного описания экологической обстановки, получаемой при учете этих факторов.

Так среди критериев отбора можно выделить следующие факторы:

-) устойчивая связь экологически неблагоприятных событий с видами производственной и хозяйственной деятельности, связанной с возможными неблагоприятными воздействиями на экологическое состояние окружающей среды (ОС);
-) взаимосвязь событий между собой, возможность их влияния не только на основополагающую сферу воздействия, но и на остальные геосферы (в т.ч., на недра, флору и фауну), а также наличие высокой вероятности неблагоприятных экологических последствий этих событий;
-) длительность существования события, которое может быть зафиксировано методами дистанционного, в т.ч. аэрокосмического, мониторинга;
-) массовость или частота события (экологические риски), связанные с типичностью порождающей его ситуации, и тяжестью последствий;
-) степень опасности события, проявляющаяся в его масштабе, возможности опасного воздействия на население, а также на окружающую среду, в том числе, на экологически значимые природные объекты и экономически наиболее ценные природные ресурсы;
-) масштаб экономических последствий события, проявляющихся в обязанности внесения платы за него, а также в возможности применения экономических санкций (штрафов) или возникновения судебных исков со стороны государства, юридических и иных лиц по поводу компенсаций;
-) возможность иных юридических последствий события, определяемых требованиями действующего российского и международного экологического законодательства, а также полити-

ческий резонанс этого события;

) региональная значимость события для территории, где оно произошло и зоны его трансграничного влияния с учетом региональных коэффициентов напряженности экологической обстановки;

) наличие объективных данных о событии, зафиксированных официальной статистикой или установленных в результате научных исследований;

) возможность фиксации и моделирования события и его последствий методами и средствами аэрокосмической съемки с последующим их отображением в ГИС-системах;

В качестве событий, удовлетворяющих описанным критериям и формирующим комплексную картину, предложен соответствующий перечень экологически значимых событий:

- загрязнения окружающей среды вследствие пожаров;
- химическое загрязнение почвы и поверхностных вод в результате разливов нефтепродуктов;
- физическое воздействие (механическое загрязнение) в том числе механическое загрязнение отходами вследствие развития свалок;
- порча природного ландшафта в части механического (стационально-деструктивного) разрушения рельефа местности и пр.

Как отмечено выше, выбранные события или их последствия доступны для определения, в частности, методами и средствами дистанционного зондирования. Рассмотрим параметры окружающей среды, получаемые непосредственно из аэрокосмических данных и получаемые по результатам обработки первичных данных по каждому из видов экологических событий:

■ *загрязнения окружающей среды вследствие пожаров на свалках, торфяных пожарах, лесных пожарах:*

○ **Параметры:** координаты, площадные характеристики (форма, размеры) пожара, дымов, температурные контрасты, радиационная температура, индексы вегетации растительности.

○ **Результаты обработки:** площадь пожара; площадь выгоревших участков (отсутствие растительности в местах пожара); вид растительности; распределение температурного поля вокруг очага возгорания и температура самого очага горения.

○ **Параметры моделирования:**

1. источник возгорания (тип источника возгорания и его теплофизические характеристики (удельная теплота возгорания)): скрытые очаги горения в торфяниках и местах складирования отходов, разливов нефтепродуктов, в лесные массивах; координаты; температура; площадь выгоревших участков; информация о растительности (вид: хвойный, лиственный), о почве);

2. распределение температурного поля вокруг очага возгорания и температура самого очага горения;

3. информация о погоде (направление, скорость ветра, влажность, дневные и ночные температуры воздуха, прогноз);

4. информация о рельефе (наличие преград для распространения огня (как природных, так и техногенных), учет рельефа местности);

5. наличие источников вторичного возгорания;

6. данные о состоянии и типах почв;

7. данные о состоянии и видовом составе растительности, о зональном распределении растительности;

8. при взрыве нефтепродуктов: пороговые уровни теплового импульса и теплового излучения при пожаре для растительности, почв и техногенного комплекса; вид пожара (в замкнутом объеме или открытый); пожарная нагрузка, (количество тепловой энергии при сгорании нефтепродуктов; интенсивность выделения тепла на пожаре (количество тепловой энергии за единицу времени (зависит от количества поступающего воздуха); массовая скорость выгорания этих продуктов (интенсивность испарения в зоне горения); площадь горения; площадь пожара; фронт пожара; линейная скорость распространения горения; период развития пожара.

▪ *Загрязнение водной поверхности нефтепродуктами:*

○ **Параметры:** координаты, спектральные коэффициенты яркости, температурные контрасты, радиационная температура, цветность вод, структура волнения (для РСА) площадные характеристики (форма, размеры).

○ **Результаты обработки:** площадь и степень загрязнения водной поверхности, структура волнения, толщина и возраст нефтяных пленок (для РСА).

○ **Параметры моделирования:**

1. технические параметры источника загрязнения (вид нефтепродукта, условия поступления нефтепродуктов в водный объект);

2. физико-химические свойства загрязнителя (нефтепродукта): вязкость, силы поверхностно натяжения, растворимость, плотность, температура кипения компонентов);

3. время, дата аварии;

4. координаты мест загрязнения, площадь, толщина пленки нефтепродуктов;

5. гидрологическая обстановка (тип водной поверхности, ее свойства: температура воды, кинематическая вязкость воды, способность водоема к самоочищению, течение и прилив, водородный показатель, процентное содержание соли);

- гидрохимические показатели (температура, °С; цветность; прозрачность, запах; баллы);

- концентрация растворенных в воде газов- кислорода, двуокиси углерода, мг/дм³;

- концентрация взвешенных веществ, мг/дм³;

- водородный показатель (рН);

- окислительно-восстановительный потенциал (Еh), мВ;

- концентрации главных ионов- хлоридных, сульфатных, гидрокарбонатных, кальция, магния, натрия, калия, сумма ионов, мг/дм³ (мг/л);

- химическое потребление кислорода, мг/дм³;

- биохимическое потребление кислорода за 5 суток, мг/дм³;

- концентрация биогенных элементов- аммонийных, нитритных и нитратных ионов, фосфатов, железа общего, кремния, мг/дм³;

- концентрации широко распространенных загрязняющих веществ- нефтепродуктов, СПАВ, летучих фенолов, пестицидов, соединений металлов, мг/дм³;

6. Метеорологическая обстановка: скорость, направление ветра, температура воздуха в местах разлива, влажность, солнечная активность, сезон года;

7. структура отложений и геологическое строение прибрежных террас (механический состав и фильтрационные свойства почвогрунтов, конфигурация береговой линии);

8. структура и состояние фитопланктона, наличие сине-зеленых водорослей, состав прибрежной флоры.

▪ *Загрязнение ОС вследствие развития свалок:*

○ **Параметры:** координаты, спектральные коэффициенты яркости, температурные контрасты, радиационная температура, индексы вегетации растительности, площадные характеристики (форма, размеры).

○ **Результаты обработки:** площадь и степени нарушения земель, растительности.

○ **Параметры моделирования:**

1. состояние и состав техногенных элементов ландшафта и инфраструктуры;

2. состояние и виды растительности;

3. состояние и состав почвенного покрова;

4. свойства самого загрязнителя, его способность воздействия на растительность;

4. данные о рельефе территории, учет поверхностного стока;

5. гидрогеологическое строение территории (в том числе учет глубины залегания грунтовых вод);

6. результаты газогеохимических исследований (по возможности)- выход биогаза на поверхность;

- *Нарушение почв вследствие механического воздействия;*

- **Параметры:** координаты, спектральные коэффициенты яркости, температурные контрасты, радиационная температура, индексы вегетации растительности, площадные характеристики (форма, размеры).

- **Результаты обработки:** площадь и степени нарушения земель, растительности, площадь опустынивания

- **Параметры моделирования:**

1. координаты, дата и характеристика источника нарушения (вид, свойства);
2. типы и состояние почвенного покрова, наличие дернового слоя, содержание гумуса;
3. геоморфологическое строение местности, формирование поверхностного стока, глубина залегания подземных вод и наличие поверхностных водоемов;
4. метеорологическая характеристика района;
5. структура техногенной составляющей ландшафта (детализация параметров- см. выше).

В качестве исходных данных (первичных материалов) для ситуационно-прогнозного моделирования можно использовать измерения с различных средств сбора информации:

- аппаратуры дистанционного зондирования;
- наземных средства сбора данных, в том числе для отбора проб;
- наземные и морские посты экологического мониторинга;
- отчетные материалы по состоянию окружающей среды в рассматриваемых областях.

Количественная оценка уровня загрязнений также возможна в отдельных случаях. Так, с учетом зависимостей скорости растекания нефтяного пятна и его радиуса, а также отражательной способности в зависимости от толщины пленки (см. рис. 1).



Расчетные характеристики аварийных разливов нефтепродуктов в безветренную погоду за 2-часовой интервал времени (по В.Н. Молчанову, 2000)

Нефтепродукт	Радиус пятна при объеме разлива от 0,1 до 10000 м ³ , м	Скорость растекания при температуре воды 0 и 20 °С, м/с
Мазут	7-2155	0,001-0,3
Дизельное топливо	16-5154	0,002-0,7
Бензин	19-5894	0,003-0,8

Рис. 1. Возможность оценки количества загрязняющего вещества для случая загрязнения поверхностных вод нефтепродуктами (Снимки предоставлены НТЦ им Тучкова)

При этом можно продемонстрировать возможность автоматизированного распознавания признаков экологических событий и определения местоположения пораженных участков. На рис. 2 показаны исходные данные и результаты автоматизированной классификации по критерию максимального правдоподобия, позволившей достаточно уверенно определить места разлива нефтепродуктов и степень загрязнения (на рис. загрязнение акватории НП по причине утечек с затопленного судна и результаты классификации).

Для обеспечения представления исходных данных для моделирования отобранных событий можно сформулировать набор требований к характеристикам и параметрам средств сбора данных. Такие требования, по различным видам загрязнения представлены в таблице 1.

В состав данных дистанционного зондирования обеспечивающих исходную информацию для мониторинга и моделирования служат изображения со спутников (NOAA, TERRA, AQUA, LANDSAT, SPOT и др.), изображения, полученные при аэросъемке. Кроме того, используются доступные для выбранных событий и районов аэрокосмической съемки наземные измерения. Также для моделирования используются архивные данные истории наблюдений. В таблице 2 представлены характеристики различных существующих средств ДЗЗ и с пометками о соответствии данных характеристик поставленной задаче. Выбор этих спутниковых средств обусловлен доступностью информации с них и оперативностью ее получения наземными пунктами приема или с использованием Интернет технологий. Сейчас также рассматривается вопрос о возможности привлечения информации со спутника «Ресурс-ДК1» с пространственным разрешением порядка 1 м.

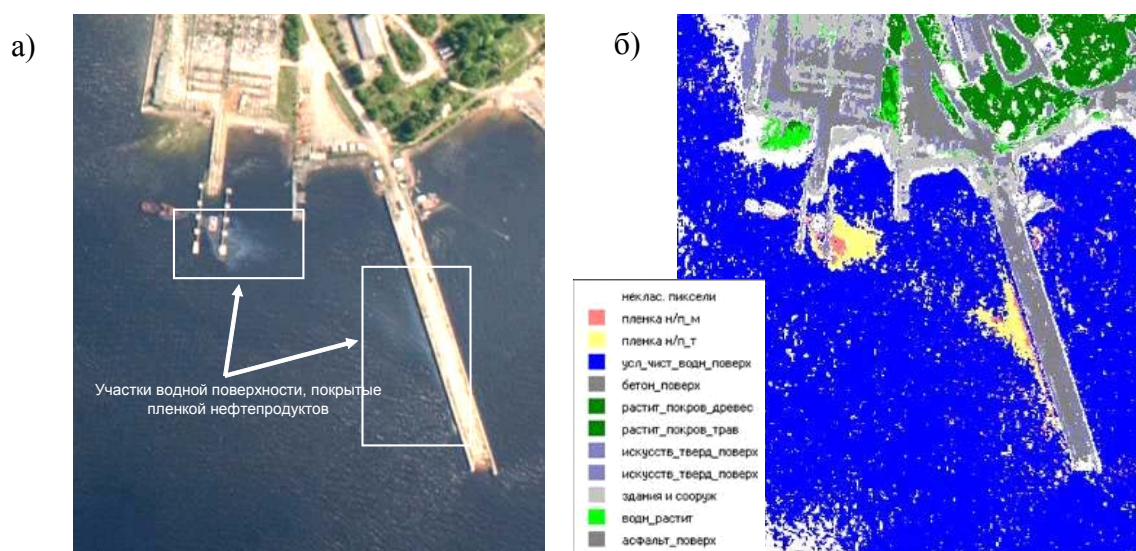


Рис. 2. Возможность автоматизированного распознавания разлива нефтепродуктов
 а) загрязнение акватории НП по причине утечек с затопленного судна; б) результаты классификации
 (Снимки предоставлены НТЦ им Тучкова)

На основании имеющихся априорных и оперативных данных может быть произведено ситуационное и прогнозное моделирование экологического состояния окружающей среды в наблюдаемой области. Поскольку, как уже отмечалось, окружающая среда является сложным объектом с большим числом параметров, и в системе мониторинга производится учет ограниченного набора экологически значимых событий по ограниченному набору параметров, описывающих ситуацию с достаточной, но не идеальной точностью, представляется целесообразным производить моделирование в приближенных моделях, учитывая погрешности на "наихудший случай" по обобщенной модели, которая объединяет влияние всех рассматриваемых экологических событий. Поскольку моделирование каждого из экологических событий производится по собственным правилам, учитывающим параметры и особенности соответствующей среды, виды и скорость распространения, характер и долговременность последствий и т.д., то комплексная модель обобщенной оценки качества окружающей среды может быть построена по результатам частных моделей на основе интегральной характеристики учитывающей степень важности экологического события, характер опасности, приоритет срочности и т.п.

Сбор и обработка этих данных проводится в соответствии со следующей схемой (рис. 3): Получаемые с различных источников данные проходят первичную обработку, в которую входят:

Таблица 1. Требования к средствам сбора информации, обеспечивающим представление исходных данных для моделирования отобранных событий

№ п/п	Экологически значимое неблагоприятное событие	Индикаторные признаки		Способ определения (физические принципы)	Информативные длины волн э/м спектра (спектральный диапазон), мкм	Рекомендуемое ЛРМ, м	Требуемое средство регистрации и сбора ДДЗ
		прямые	косвенные				
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Загрязнение земли	форма геометрически неопределенная, компактная; цвет зависит от подстилающей поверхности, весь контур изображается одним цветом, структура однородная котловинообразная	приуроченность к населенным пунктам, аномальные физические изменения поверхности почв и растительного покрова	видео- и фотосъемка	0,45-0,65	до 1	цифровой цветной фотоаппарат (ЦЦФ) с ЛРМ до 1 м при высоте съемке 3000 м
2	Загрязнение почвы отходами производства и потребления	форма неопределенная для санск., компактная; размеры от 2 м2 до 0,5 км2, в кл. санкционированные полигоны хранения отходов; спектральные признаки зависят от морфологии отходов - выделяется светлым и светло-серым фототон; структура пятнисто-зернистая	приурочены к населенным пунктам, воинским частям и рекреационным зонам; возможна деградация и повреждение растительного покрова по периметру свалки	видео- и фотосъемка, ИК радиометрия	0,45-0,65 8-14	до 1	ЦЦФ с ЛРМ до 1 м при высоте съемке 3000 м, ИК сканер
3	Загрязнение почвы нефтепродуктами	форма (геометрически неопределенная, компактная), выделяется темным фототон на цветных изображениях и светлым на тепловых ИК изображениях в теплое время года	приурочены к потенциальным источникам загрязнения окр. ср. н/п (базы горючего, мазутные хоз-ва котельных, пункты перевалки н/п и т.п.); возможно деградация древесной растительности в местах пролива н/п	видео- и фотосъемка, ИК радиометрия	0,45-0,65 8-14 (или 0,7-1,1)	до 0,5	ЦЦФ с ЛРМ до 1 м при высоте съемке 3000 м, ИК сканер
4	Загрязнение поверхностных вод нефтепродуктами	форма, размер, спектральные характеристики и фототон нефтяных пятен определяется в соответствии с ПОПС ВМФ, в основном ярко радужные разводы или темный фототон	исчезновение отдельных видов гидроситов, появление зон развития сине-зеленых водорослей	видео- и фотосъемка, ИК радиометрия	0,45-0,65 0,7-1,1 8-14	до 1	ЦЦФ с ЛРМ до 1 м при высоте съемке 3000 м, ИК сканер
5	Загрязнение леса при пожаре	участки загрязнения характеризуются изменением спектральных признаков лесного массива в результате повреждения древостоя - повышение отражения в красном и бл. ИК по сравнению с незагрязненными	участки возгорания природного и антропогенного характера, дымовой шлейф от пожаров, наличие тепловой аномалии	видео- и фотосъемка, ИК радиометрия	0,45-0,65 0,7-1,1 8-14	до 1	ЦЦФ с ЛРМ до 1 м при высоте съемке 3000 м, ИК сканер
6	Загрязнение атмосферного воздуха аэрозолями	форма дымового шлейфа вытянутая, выделяется сплошной структурой, полностью закрывая изображение территории, или размытостью, частично нарушающей изображение; светлым и светло-серым фототон на цифровых цветных и тепловых изображениях, темным - на изображениях в бл. ИК диапазоне э/м спектра	приуроченность к урбанизированным ландшафтам, промышленным застройкам; деградация и повреждение лесного покрова по направлению дымового шлейфа; изменение отражательной способности снежного покрова	видео- и фотосъемка, ИК радиометрия	0,45-0,65 0,45-0,65 0,7-1,1 (или 8-14)	до 1	цифровой цветной фотоаппарат с ЛРМ до 1 м при высоте съемке 3000 м
7	Порча природного ландшафта в части стац.-дест. Воздействия	линии неправильной формы для нелинейной эрозии, чередование светлых пятен смывных почв на возвыш. участках и темных пятен намывных почв в понижениях для плоскостной эрозии; светлые пятна на выдувания почв, вытянутые по направлению ветра для дефляции	эрозионные формы микрорельефа местности, отсутствие растительного покрова в местах локализации эрозии	видео- и фотосъемка, ИК радиометрия	0,45-0,65 8-14	до 1	ЦЦФ с ЛРМ до 1 м при высоте съемке 3000 м, ИК сканер
8	Уничтожение леса по причине пожара	границы в выгоревших участках неровные, чаще всего клиновидные; выделяются темно-серым или темным тоном, наличием обгоревших пород деревьев или их полным отсутствием; в теплый период года на изображениях ИК диапазона э/м спектра выделяются светлым фототон, соответствующим повышенному температурному полю	участки возгорания природного и антропогенного характера, дымовой шлейф, наличие тепловой аномалии	видео- и фотосъемка, ИК радиометрия	0,45-0,65 0,7-1,1 8-14	до 1	цифровой цветной фотоаппарат с ЛРМ до 1 м при высоте съемке 3000 м, ИК сканер

- коррекция и калибровка изображения;
- выделение изображения контролируемого участка;
- подготовка изображения к осуществлению геопривязки и внесению в ГИС.

Обработанные таким образом изображения или атрибутивные данные проходят географическая привязка и вносятся в геоинформационную систему, на базе которой и производится весь цикл дальнейшей обработки данных от анализа текущей обстановки до прогнозного и ситуационного моделирования или формирования отчетов и оперативных карт. Выбранная геоинформационная система "Интеграция" позволяет производить весь необходимый набор операций, среди которых:

Таблица 2. Спутниковые средства ДЗЗ, предлагаемые для экологического мониторинга

Спутники (дата запуска)	Основные характеристики	Орбита: высота [км]/наклонение [°]/период [мин.]	Приборы ¹	Характеристики исп. прибора (вес/ размеры/ потребление)	Спектр. характеристики	Простр. разрешение/ полоса обзора	Частота покрытия
NOAA- 12, 14, 15, 16, 17 (14.05.1991, 12.09.2000) ²	Вес 2.23 т, Ø 1.88 м	Солнечно-синхрон.: ~830/98.7/ 101	AVHRR , TOVS (MSU+HIRS) и др.	33 кг, 0.75x0.36x0.29 м, 27 Вт	0.58-0.68, 0.726-1.0 (1.58-1.64, 2.53-3.93), 10.3-11.3, 11.5-12.5	1.1 км/ 3200 км	От 3 час.
Terra (18.12.1999)	Вес 5.19 т, Ø 3.5 м, мощность 2.53 кВт	Солнечно-синхрон.: 705/98.2/ 98.88	CERES , MISR, MODIS , MOPITT, ASTER	229 кг/ 104.4x118.4x 163.8 см/ 225 Вт; 6.2 Мб/сек.	36 спектр. каналов: 21 в 0.4- 3.0 мкм; 15 в 3-14.5 мкм	250 м (2 кан.), 500 м (5 кан.),	1 раз в 1-2 дня
Aqua (4.5.2002)	Вес 3.117 т, 4.444 кВт	то же	MODIS , AMSR-E, AMSU-A, CERES, AIRS, HSB	то же	то же	то же	то же
ERS-1, -2 (1.07.1991, 21.4.1995)	2157.4 кг, 2.6 кВт	Солнечно-синхрон.: 782-785/ 98.52/ 100	AMI-SAR , RA, ATSR, LR (GOME, MS)	325.8 кг/ 10x1 м	C-band (5.33 ГГц (5.6 см)), 15.55 МГц, VV	20-25 м/ 102.5 км	Повтор покрытия 3, 35 и 176 дней (через 1 день)
Ресурс- 01 № 3, № 4 (4.11.1994, 10.7.1998)	1950 (3280) кг	Солнечно-синхрон.: 678 (835)/ 98.04/ 98	МСУ-Э , МСУ-СК, МР-900М и др.	33 кг/ /150 Вт	0.5-0.59, 0.61-0.69, 0.81- 0.9 мкм	~ 40 м/ 45 (80) км	21 сутки
Метеор-3М № 1 (10.12.2002)		Солнечно-синхрон.: 1020/ 99.6/ 105.3	МСУ-Э , МСУ-СК, МР-2000Р, Климат, МТВ3А, SAGE-III и др.	то же	то же	38 м/ 78 км	21 сутки

¹ Жирным шрифтом выделены приборы, представляющие интерес для экологического мониторинга (для них приводятся характеристики в следующих двух столбцах).



Рис. 3. Общая структурная схема средств сбора, обработки и представления информации, обеспечивающих представление исходных данных для моделирования экологических событий

- 1) оценка состояния природной среды наблюдаемых и анализируемых областей;
- 2) топографическая привязка анализируемых участков местности;
- 3) формирование массивов данных, характеризующих анализируемый участок;
- 4) отображение результатов анализа экологической обстановки в наблюдаемых районах;
- 5) формирование и нанесение условных обозначений в соответствии с принятыми нормативными документами и результатами анализа состояния природной среды;

б) формирования БД и справочной информации по экологическому контролю наблюдаемых районов.

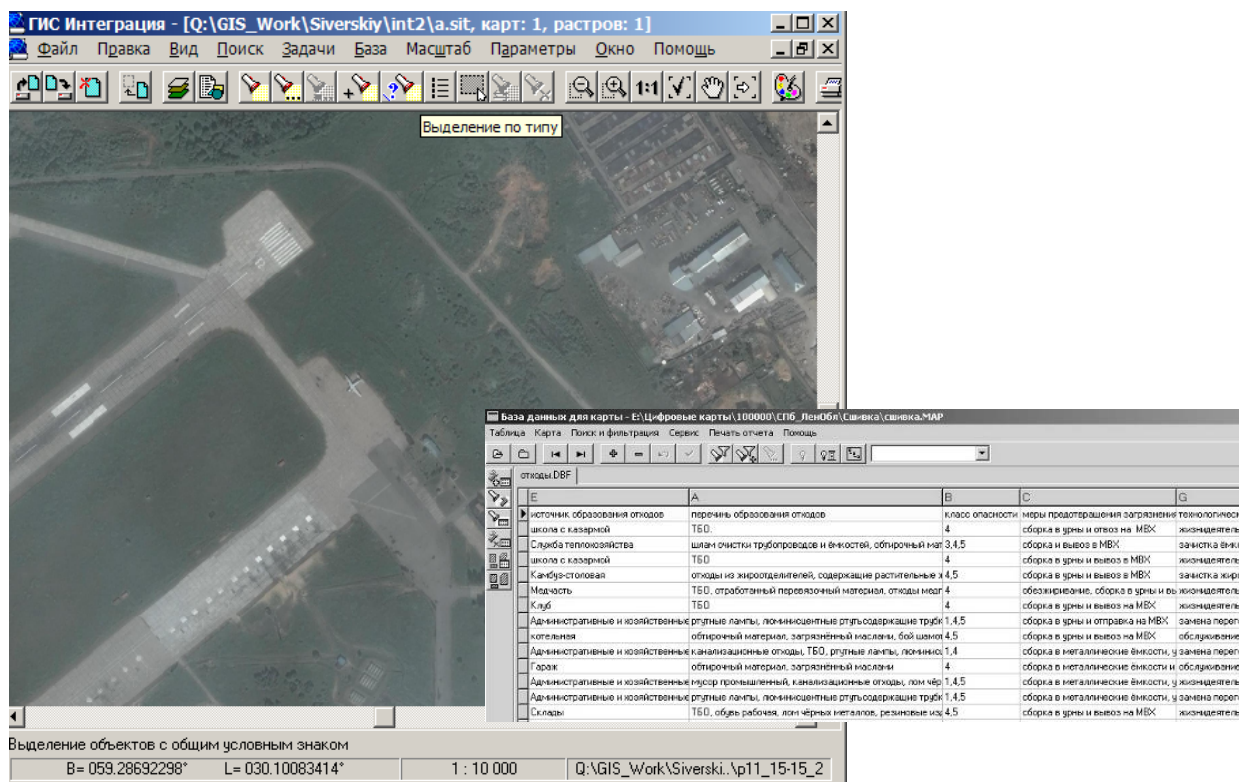


Рис. 4. Геоинформационная система "Интеграция" отображает растровый слой, содержащий космический снимок (по материалам Google Earth™)

Одновременная работа с несколькими растровыми или векторными слоями изображения, параллельный учет атрибутивной информации и ведение баз данных (рис. 4) в среде ГИС "Интеграция" с ее широкими возможностями по формированию и выводу отчетов и карт позволяют построить комплексную систему обработки и отображения истории наблюдений, данных мониторинга, текущего состояния и результатов ситуационного и прогнозного моделирования экологического состояния окружающей среды.

Таким образом можно сделать вывод о возможности эффективного использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса для определения экологической обстановки по ряду выбранных экологически значимых событий.

При учете дополнительной информации от наземных источников возможно построение прогнозных моделей экологического состояния по ряду видов загрязнений.

Использование ГИС совместно со средствами предварительной обработки позволяет вести комплексный мониторинг и экологического состояния наблюдаемых объектов.